This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

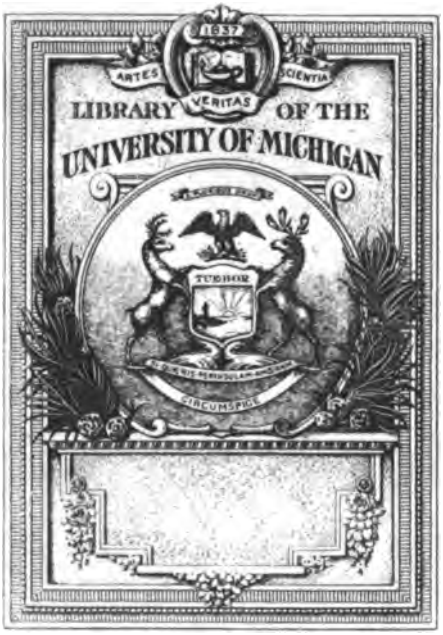
+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.



THE GIFT OF
Dr. H. H. Willard.

Physics Lib,
QD
181
.S5
R56

Das Selen.

Das Selen

von

Dr. Chr. Ries.

Mit 261 Abbildungen.

1918

Jos. C. Hubers Verlag, Diessen vor München

Copyright 1918 by Jos. C. Huber, Diessen vor München.

Der Nachdruck einzelner Kapitel sowie Abschnitte
ist nur mit Einverständnis des Verlages gestattet.

Druck der Graph. Kunstanstalt Jos. C. Huber
Diessen vor München

Physics Library
Dr. H. N. Willard.
Gift
1-8-1927.

Inhalt.

Seite

A. Die Eigenschaften des Selens 9

I. Allgemeine Eigenschaften des Selens 10
II. Das Verhalten der drei Selenformen Se_0, Se_1, Se_2 gegen Wärme . . 21
III. Die Herstellung der Selenzellen 41
IV. Widerstand und Lichtempfindlichkeit des Selens 61
V. Einfluß der Spannung auf Leitfähigkeit und Lichtempfindlichkeit . 77
VI. Der Einfluß der Temperatur auf die Lichtempfindlichkeit 88
VII. Abhängigkeit der Lichtwirkung von der Stärke und Farbe des Lichtes 95
VIII. Abhängigkeit der Leitfähigkeit und Lichtempfindlichkeit vom Druck 127
IX. Die Trägheit des Selens 131
X. Der Einfluß von Verunreinigungen und Feuchtigkeit auf die Lichtempfindlichkeit des Selens 147
XI. Negative Lichtempfindlichkeit 162
XII. Sekundärströme, Gleichrichterwirkung, Wechselstromeffekt 173
XIII. Einfluß der unsichtbaren Strahlungen auf die elektrische Leitfähigkeit des Selens 181
XIV. Thermoelektrische Kraft und Wärmeleitfähigkeit des Selens . . . 187
XV. Selenelemente 188
XVI. Die lichtelektrische Zerstreuung am Selen 196
XVII. Die Ursache der Lichtempfindlichkeit des Selens 200

B. Die Anwendungen des Selens in der Elektrotechnik 219

I. Hilfsvorrichtungen:
a) Vorrichtungen zur Beseitigung der Trägheit und Inkonstanz des Selens 220
b) Vorrichtungen zur Verstärkung des Lichteffektes (Relais, Zwischenklisches) 227
II. Lichtmessung (Photometrie) 240
III. Die Selenzelle im Dienste der Astronomie 245
IV. Zeitbestimmung auf Tausendstel einer Sekunde 249
V. Optische Zählvorrichtung; Ersatz der Briefmarke 254
VI. Die Selenzelle im Dienste der Photographie 260
VII. Die Messung der Röntgenstrahlen 261
VIII. Automatische Signal- und Registrierapparate 277
IX. Sortierung nach Farben 290
X. Prüfung der Qualität von Lampen 292
XI. Drahtlose Lichttelephonie 292

XII. Photographie der Sprache; selbsttätige Aufzeichnung von Gesprächen und spätere telephonische Wiedergabe derselben; der sprechende Film 301
XIII. Blindenlesemaschinen und Lichthörer 307
XIV. Die elektrische Übertragung von Bildern und Zeichnungen 326
XV. Fernsehen 339

C. Literaturübersicht 350

D. Verzeichnis der Autoren 375

E. Sachregister 377

Vorwort.

Im Herbste 1908 wagte ich mich in die Öffentlichkeit mit dem bescheidenen Büchlein „Die elektrischen Eigenschaften und die Bedeutung des Selens für die Elektrotechnik", das trotz des sehr engen Leserkreises, an den es gerichtet war, bereits nach 4 Jahren eine wesentlich erweiterte Neubearbeitung erhalten mußte (2. Aufl. 1913, Verlag Harrwitz, Berlin-Nikolassee). Nun hat die Selenforschung in den letzten Jahren einen mächtigen Umfang angenommen, auch arbeitet man gegenwärtig mit besonderem Eifer an der Verwirklichung bedeutender Probleme mittels der Selenzelle. Die große Zahl von Anfragen und Anregungen, die in letzter Zeit teils über technische, teils über rein wissenschaftliche Fragen der Selenforschung an mich ergingen, hat mich zu vorliegendem umfangreichen Werke veranlaßt, das eine möglichst gründliche Darstellung des gesamten Gebietes bringen soll. Möge das Werk dazu beitragen, die verwickelten Vorgänge im Selen weiter zu klären und den merkwürdigen Stoff in möglichst großem Umfange dem Wohle der Menschheit dienstbar zu machen.

München, im Januar 1918.

Dr. Chr. Ries.

A.

Die Eigenschaften des Selens.

Schon ehe man das Wesen von Elektrizität und Licht*) erkannt hatte, war man zu der Überzeugung gekommen, daß zwischen beiden ein inniger Zusammenhang bestehen müsse. Denn die experimentellen Forschungsresultate ergaben, daß starke elektrische bezw. magnetische Felder auf einen Lichtstrahl einzuwirken vermögen (magnetooptische Erscheinungen) und daß umgekehrt Lichtstrahlen imstande sind, elektrische Vorgänge zu beeinflussen (lichtelektrische Erscheinungen).

Daß ein kräftiges Magnetfeld, wie wir es durch einen Elektromagneten erzeugen können, auf das Licht, wenn es ein magnetisches Medium durchsetzt, eine Wirkung ausübt, war schon seit Faraday bekannt (Faraday-Effekt 1845). Daß aber ein Magnetfeld die Lichtquelle selbst zu beeinflussen vermag, indem es gewisse Linien im Spektrum von leuchtenden Dämpfen in mehrere Linien spaltet, hat erst Zeemann beobachtet (Zeeman-Effekt 1897).

Was die elektrischen Wirkungen des Lichtes betrifft, so hat man zuerst im Jahre 1839 folgende Erscheinung entdeckt: Belichtet man von zwei in einen Elektrolyt tauchenden Elektroden die eine, so wird deren Potential verändert und es entsteht ein elektrischer Strom (Becquereleffekt 1839). Der große deutsche Physiker Hertz beobachtete die überraschende Erscheinung, daß die Funkenentladung zwischen 2 Elektroden erleichtert wird, wenn man die negative Elektrode, die Kathode, mit ultraviolettem Lichte bestrahlt (Hertzeffekt 1887). Noch größeres Interesse bot die im gleichen Jahre gemachte Beobachtung, daß eine blanke Metallplatte eine ihr erteilte negative Ladung unter dem Einflusse des ultravioletten Lichtes verliert (Hallwachseffekt 1887). Eine der merkwürdigsten Naturerscheinungen haben wir zweifellos in der Lichtempfindlichkeit derjenigen Körper, die ihren elektrischen Widerstand mit der Beleuchtungsstärke ändern und daher Helligkeitsunterschiede in Stromschwankungen umzusetzen gestatten. Solche Körper machen es möglich, die allerfeinsten Ener-

*) „Elektrizität und Licht als elektronische Vorgänge" von Dr. Chr. Ries, 1. Auflage 1918, Verlag Jos. C. Huber in Diessen vor München.

gieänderungen, das Licht, zu praktischen Arbeitsleistungen für den Menschen zu zwingen. Unter den hieher gehörigen Stoffen nimmt das Selen weitaus den ersten Platz ein.

Da das Selen rasch wechselnde Lichteindrücke nicht bloß nach ihrer Stärke, sondern in bestimmten Fällen auch nach ihrer Farbe zu unterscheiden vermag, leistet es in gewisser Beziehung dasselbe wie unser Auge. Daher wird das Selen vielfach als das elektrische Auge bezeichnet. Schon hat die Lichtempfindlichkeit dieses wunderbaren Körpers die herrlichsten Anwendungen in der Elektrotechnik gefunden, während andere schwierige Probleme der Lösung entgegengehen. Aber das Selen hat auch seine Fehler, deren Beseitigung die größten Schwierigkeiten macht. Daher ist es Aufgabe des Konstrukteurs, die manigfachen Eigenschaften dieses merkwürdigen Stoffes eingehend zu studieren, um denselben in möglichst großem Umfange dem Wohle der Menschheit dienstbar machen zu können.

I. Allgemeine Eigenschaften des Selens.

Das Selen (Se) ist ein chemisch einfacher Körper, ein Element. Es wurde im Jahre 1817 von Berzelius (1)*) im Bleikammerschlamm der Schwefelsäurefabrik zu Gripsholm in Schweden entdeckt. In der Natur ist das Selen weit verbreitet, kommt aber nirgends in größeren Mengen vor. Im allgemeinen findet es sich in Verbindung mit Metallen, besonders mit Blei in Form von Selenblei, vielfach auch in einzelnen Schwefelkiesen, in Begleitung mit Schwefel, mit dem es verwandt ist. Hergestellt wird das Selen hauptsächlich als Nebenprodukt bei der Schwefelsäurefabrikation aus dem Bleikammerschlamm. Man behandelt den Schlamm mit Salpetersäure und verdampft die Lösung der gebildeten Selensäure mit Salzsäure. Dieselbe geht dabei in selenige Säure über und aus dieser wird durch schwefliche Säure rotes Selen gefällt. Auf diesem Wege erhält man das Selen im amorphen Zustand als rotes Pulver.

Schmilzt man das rote amorphe Selen, so entsteht eine schwarze spiegelnde Flüssigkeit, die bei rascher Abkühlung zu einer schwarzglänzenden, glasigen Masse erstarrt. Dieses schwarze amorphe Selen unterscheidet sich von dem roten pulvrigen nur durch die Farbe. Denn man erhält durch Pulverung des schwarzen Selens ein rotes Pulver und umgekehrt durch Pressen des roten Selens ein schwarzes, graphitglänzendes Präparat (Saunders 147, Schrott 258). Es

*) Die in Klammern stehenden Nummern beziehen sich auf die in C folgende Literaturübersicht.

handelt sich also bei dem roten und schwarzen amorphen Selen um ein und dieselbe Modifikation. Im Handel bekommen wir das Selen entweder als rotes Pulver, zum Schutze gegen Feuchtigkeit luftdicht in ein Glas verschlossen, oder in Form von schwarzen Stangen, Kugeln oder Barren.

Das amorphe schwarze Selen ist eine siegellackartige, glasige Masse von schwarzglänzendem Aussehen; in dünnen Schichten jedoch erscheint es im durchfallenden Lichte rubinrot. Seine Durchlässigkeit für einen großen Strahlenbereich im Ultrarot ist ein äußeres Zeichen dafür, daß wir es mit einem Nichtleiter der Elektrizität zu tun haben. Das amorphe Selen ist ein Isolator. Bei gewöhnlicher Temperatur ist amorphes Selen in Schwefelkohlenstoff löslich und zwar beträgt die Löslichkeit nach Marc (282) 0,065 g in 100 ccm Schwefelkohlenstoff.

Erhitzt man amorphes Selen langsam, so geht es ungefähr bei 90° in eine graue kristallinische Modifikation über. Setzt man die Temperaturerhöhung langsam fort, so kann man eine allmähliche Farbenänderung des Selens beobachten, bis es bei 217°, nach Saunders (147) bei 220°, schmilzt und in eine schwarze dickflüssige Masse übergeht. Die Bildung des grauen kristallinischen Selens vollzieht sich also bei Erhitzung auf 90—217°. Das bei niedrigerer Temperatur gewonnene Selen hat ein mattgraues Aussehen, aber einen schwach rötlichen Schimmer und besteht, wie man unter dem Mikroskop beobachten kann, aus runden Körnchen, weshalb es auch leicht brüchig ist. Erhitzt man aber ein Präparat längere Zeit auf 200—210°, so schwindet es wesentlich, zeigt ein mehr verflochtenes Netzwerk, mehr längliche Kristalle und ein hellgraues metallartiges Aussehen. Diese Selenform ist viel haltbarer und läßt sich sogar auf der Drehbank bearbeiten. Das durch Erhitzungsprozesse entstehende graukristallinische Selen besteht demnach aus zwei verschiedenen Selenformen. Bei niedriger Erhitzungstemperatur enthält ein Präparat nur die eine Selenart, während ein bei hoher Temperatur erhaltenes Präparat ein Konglomerat aus den beiden Selenformen ist. Es gelingt selbst bei wochenlanger Erhitzung bis kurz vor den Schmelzpunkt nicht eine einheitliche Selenform herzustellen. Fig. 1 zeigt uns ein Präparat von Uljanin (98), welches bis 200° im Sandbad erhitzt und dann abgekühlt worden war. Die 2 Selenarten lassen sich leicht unterscheiden. Das Präparat ist an den Rändern meist der helleren Selenform gleich, gegen die Mitte sind aber Stücke der anderen dunkleren Selenform eingewachsen. Die Kriställchen der helleren Selenform sind sehr klein, gehören dem hexagonal-rhomboedrischen System an und sind mit dem Tellur vollkommen isomorph. Daher erklärt sich auch der

Umstand, daß Selen als isomorphe Beimischung in den natürlich vorkommenden Tellurkristallen gefunden wird (Muthmann 106).

Das durch einen Erhitzungsprozeß gewonnene graue kristallinische Selen leitet den elektrischen Strom und zwar wächst die Leitfähigkeit im allgemeinen mit der Höhe der Erhitzungstemperatur und der Dauer der Erhitzung. Der spezifische Widerstand dieser Selenmodifikation beträgt einige Hunderttausend Ohm, ist also ziemlich beträchtlich. Die zwei Selenformen des kristallinischen Selens, die wir vorhin schon äußerlich durch die Farbe unterschieden, zeigen gegen den elektrischen Strom ein ganz verschiedenartiges Verhalten. Die

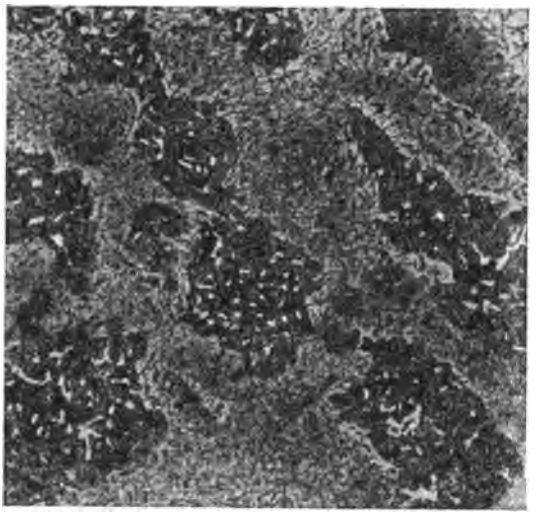


Fig. 1.

bei tieferer Kristallisationstemperatur entstehende dunklere Selenart leitet wie Kohle, d. h. ihr Widerstand nimmt mit Temperaturerhöhung ab; wir drücken diese Tatsache künftighin durch die Worte aus, der Temperaturkoeffizient des Widerstandes sei negativ. Wir wollen diese Selenform mit Se_1 bezeichnen. Die bei höherer Kristallisationstemperatur erhaltene Selenform dagegen leitet wie die Metalle, sie besitzt einen positiven Temperaturkoeffizienten des Widerstandes und wird als metallisches Selen oder kurz mit Se_2 bezeichnet. Wir werden die Entstehung dieser Selenformen und ihr Verhalten gegen Wärme im nächsten Abschnitt ganz besonders ausführlich behandeln. Über die Beobachtungen an sehr dünnen Schichten kristallinischen Selens vergl. S. 50—58.

Geschmolzenes Selen siedet bei ca. 700°. Beim Erhitzen an der Luft verbrennt es mit hellblauer Flamme unter Verbreitung von Rettichgeruch zu Selendioxyd. Geschmolzenes Selen verhält sich zu Metallen, Glas usw. wie Wasser zu einer fettigen Oberfläche, indem es in Tröpfchen zusammenläuft. Durch rasches Abkühlen geschmolzenen Selens erhält man wieder die schwarze amorphe Modifikation. Dagegen kann man durch äußerst langsame Abkühlung und durch eine konstante Temperatur von 200—210° aus dem geschmolzenen Selen die graukristallinische Modifikation herstellen.

Brown (456, 459) soll es gelungen sein, aus geschmolzenem Selen einzelne Kristalle metallischen Selens zu erhalten. Das amorphe Selen wurde in eine Glasröhre gefüllt, die luftleer gepumpt und verschlossen wurde. Die Röhre wurde dann Monate lang auf einer konstanten hohen Temperatur erhalten. Dabei destillierte das amorphe Selen in Kristalle über, die sich an der oberen Schicht festsetzten. Brown erhielt bei Erhitzung des geschmolzenen Selens auf 190—220° C während 1 bis 2 Wochen nadelförmige Kristalle des hexagonalen Selens. Wurde jedoch geschmolzenes Selen bei 170° während langer Zeit im Vakuum oder auch bei 190° unter Atmosphärendruck erhitzt, so entstanden Lamellenkristalle des monoklinen Systems. Die Kristalle erreichten eine Länge von 1 bis 1,5 cm; sie erwiesen sich in ihrer ganzen Länge als lichtdurchlässig und zwar hatte das durchgehende Licht meist intensive blaue oder rote oder gelbe Färbung je nach der Dicke des Kristalles. Die Kristalle zeigten im allgemeinen Doppelbrechung. Das Reflexionsvermögen der Lamellenkristalle war von 370 bis 800 μμ konstant (vergl. S. 17).

Graukristallinisches Selen erteilt dem Schwefelkohlenstoff nach dem Grade der Reinheit eine verschiedene Färbung; es ist um so weniger löslich, je reiner es ist, d. h. je weniger es von einer der anderen Modifikationen enthält. Der Grad der Löslichkeit in Schwefelkohlenstoff gibt uns Aufschluß darüber, wieweit sich die Umwandlung des Selens in die graukristallinische Form vollzogen hat. Marc (282) hat für drei Präparate, die unter den gleichen Bedingungen geprüft wurden, folgende Resultate erhalten. Untersucht wurden:

1. Selen, das 6—7 Stunden auf 180° erhitzt war,
2. Selen, das aus dem Schmelzfluß bei 200° kristallisiert war,
3. Selen, das einmal rasch auf 140° erhitzt war.

Bei den zwei ersten Präparaten war der Schwefelkohlenstoff nach 48 Stunden völlig farblos und nach dem Abdestillieren konnte keine wägbare Menge Selen gefunden werden,

so daß die Kristallisation offenbar vollständig war. Bei dem dritten Präparat hatte sich der Schwefelkohlenstoff lichtgelb gefärbt; im Rückstand waren aber nur 0,4 mg Selen zu finden.

Dagegen scheint reines graukristallinisches Selen, das bei gewöhnlicher Temperatur unlöslich ist, nach Versuchen von Marc bei der Temperatur des siedenden Schwefelkohlenstoffes eine ganz merkbare Löslichkeit zu besitzen.

Auch auf chemischem Wege läßt sich das amorphe Selen in andere Modifikationen überführen. In gewissen Lösungsmitteln, namentlich in stickstoffhaltigen, wie Chinolin, Anilin entsteht aus dem amorphen Selen die graukristallinische Form (Mitscherlich 7, Saunders 147, Schrott 258). Es sollen hier einige Resultate von Schrott näher angegeben werden.

Läßt man eine wässerige Lösung von Kaliumselenid an der Luft stehen, so scheidet sich kristallinisches Selen in Form schwarzer, graphitisch glänzender Körner oder Blättchen aus. Diese wurden gewaschen, fein zerrieben, mit Schwefelkohlenstoff gekocht, um Spuren amorphen Selens zu entfernen und im Vakuum über Chlorcalcium getrocknet. Zerrieben gaben die Blättchen ein Pulver, welches sich fettig, ähnlich wie Graphit, anfühlte und an allen Gegenständen, mit denen es in Berührung kam, haften blieb. Das Pulver läßt sich gut pressen. Die gepreßten Präparate sind im Bruche muschelig, feinkörnig, von stahlgrauer Farbe, nehmen bei Bearbeitung mit der Feile Metallglanz an und haben somit dasselbe Aussehen wie die durch Erhitzung kristallinisch gemachte Modifikation. Es zeigte sich aber, daß das aus Kaliumselenid kristallisierte Selen bei gewöhnlicher Temperatur ein Nichtleiter war.

Rotes amorphes Selen wurde mit einer entsprechenden Menge Chinolin übergossen und bei ca. 20° vierzehn Tage lang unter häufigem Umschütteln, öfterem Reiben in einer Reibschale und Zurückgießen in einen verschließbaren Glaskolben stehen gelassen. Es nahm während dieser Zeit eine dunkle braunrote Farbe an. Das Pulver wurde sorgfältig gewaschen, im Vakuum über Chlorcalcium getrocknet und gepreßt. Die gepreßten Zylinder hatten große Festigkeit und waren vollkommen homogen; die braunrote Farbe war verschwunden, die Bruchfläche hatte eine hellgraue Farbe von stahlartigem Aussehen, war sehr feinkörnig und nahm bei Bearbeitung mit der Feile Metallglanz an, so daß sich das Präparat äußerlich in nichts von der durch Erhitzung erhaltenen kristallinischen Modifikation unterschied. Das durch Behandlung mit Chinolin gewonnene graukristallinische Selen besitzt elektrische Leitfähigkeit; allerdings ist der spezifische Widerstand dieser Selenart ziemlich hoch.

In anderen Lösungsmitteln (Schwefelkohlenstoff, Aceton, Benzonitril) erfolgt eine Umwandlung des amorphen Selens in eine rote kristallinische Modifikation. Schrott (258) hat diese Selenform besonders genau untersucht; er gewann dieselbe teils aus einer Lösung des schwarzen amorphen Selens in Schwefelkohlenstoff, teils durch langes Stehenlassen des roten Selens in Schwefelkohlenstoff. Das aus Schwefelkohlenstoff kristallisierte Selen bestand meistens aus Mischkristallen zweier Kristallformen. Wurden die Kristalle aufs feinste zerrieben, so zeigte das entstandene Pulver große Ähnlichkeit mit dem roten amorphen Selen. Beim Pressen jedoch behielt die Selenmasse die rote Farbe bei, der Bruch war blätterig, der Zusammenhang wenig fest. Bei der Überführung des roten amorphen Selens in rotes kristallinisches wurde in folgender Weise verfahren: Rotes amorphes Selen wurde mit Schwefelkohlenstoff übergossen und bei Zimmertemperatur unter öfterem Umschütteln 14 Tage stehen gelassen. Das anfänglich in der Flüssigkeit suspendierte Pulver hatte im Laufe dieser Zeit eine viel kompaktere Form angenommen und war zu Boden gesunken. Im Pulver zeigten sich glänzend rote Kristallblättchen, während die Farbe nicht wesentlich geändert war. Die ganze Masse wurde hierauf nochmals in einer Reibschale zerrieben, gewaschen, im Vakuum über Chlorcalcium getrocknet und gepreßt. Beim Pressen zeigte das Selen dasselbe Verhalten wie das aus Schwefelkohlenstoff kristallisierte. Die gepreßten Zylinder behielten die rote Farbe bei, hatten im Bruche blätteriges Gefüge und bröckelten leicht ab. Die rote kristallinische Modifikation erwies sich als Nichtleiter der Elektrizität, gleichgültig in welcher Weise sie gewonnen wurde.

Wird kristallinisches rotes Selen erhitzt, so schmilzt es bei 144°, erstarrt dann wieder und verwandelt sich in graukristallinisches Selen, das bei 219° flüssig wird (Coste 328). Erhitzt man rotes kristallinisches Selen rasch, indem man es in ein Luftbad von 200° bringt, so schmelzen die Kristalle und geben bei raschem Erkalten eine glasige Masse. Das graukristallinische Selen, auch das aus Selenkalium gewonnene, dagegen verändert sich nicht, wenn es auf dieselbe Temperatur erhitzt wird (Mitscherlich 7).

Das graukristallinische Selen, das durch einen Erhitzungsprozeß oder durch Stehen in Chinolin gewonnen wird, hat die merkwürdige Eigenschaft, daß sein elektrischer Widerstand unter dem Einflusse des Lichtes beträchtlich abnimmt. Dieser wunderbaren Eigenschaft, die wir Lichtempfindlichkeit nennen, verdankt das Selen seine Bedeutung für die Elektrotechnik.

Das spezifische Gewicht des amorphen Selens ist im Mittel 4,26 und zwar hat nach Schaffgotsch (6) das rote

amorphe Selen das gleiche spezifische Gewicht wie das schwarze. Die Angaben über das spezifische Gewicht des kristallinischen Selens weichen natürlich je nach der Herstellung der untersuchten Präparate stark von einander ab; es wurden Werte von 4,46—4,80 gefunden. Für metallisches Selen, das durch längeres Erhitzen des amorphen Selens auf 200—215° erhalten wird, fand man allgemein den Wert 4,80 (Schaffgotsch 6, Coste 328, Kruyt 335 u. a.); zu dem gleichen Wert gelangten Schaffgotsch (4) und Kruyt (335) bei kristallinischen Präparaten, die durch langsames Abkühlen geschmolzenen Selens erhalten worden waren. Dagegen fand Kruyt für kristallinisches Selen, das nicht höher erhitzt worden war als zum Kristallisieren nötig ist, ein geringeres spezifisches Gewicht und zwar 4,5—4,6. Ferner verwandelt sich nach Kruyt kristallinisches Selen vom spez. Gewicht 4,8 durch nochmaliges Erhitzen auf 125° in solches vom spezifischen Gewicht 4,77. Mitscherlich (7) bestimmte das spez. Gewicht für Selenkristalle, erhalten aus einer Lösung des Selens in Schwefelkohlenstoff, zu 4,46—4,51 bei 15° C. Die etwas niedrigen Werte erklärt er durch kleine Höhlungen in den Kristallen. Das spez. Gewicht des aus einer Lösung von Selennatrium kristallinisch ausgeschiedenen Selens beträgt nach Mitscherlich 4,76—4,79 bei 15°. Für kristallinisches rotes Selen fand Coste (328) den Wert 4,45.

Die spezifische Wärme des kristallinischen Selens beträgt nach Regnault (8) 0,0837, nach Neumann (10) 0,0860, nach Bettendorf und Wüllner (11) 0,08404—0,0953. Die Unterschiede erklären sich aus der Verschiedenheit der Präparate.

Den linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten bestimmte Fizeau (12) für amorphes Selen zu 0,0000368 bei 40°, für kristallinisches zu 0,0000493 bei 20°. Spring (70) findet bei kristallinischem Selen vom spez. Gewicht 4,7176 für den Ausdehnungskoeffizienten den Wert 0,0001478 bei 20° C, für kristallinisches Selen, das gepulvert und unter einem Druck von 6000 Atm. gepreßt wurde, 0,0001307.

Die Absorption des kristallinischen Selens wurde von Pfund (336) für den Wellenlängenbereich von 1000 bis ca. 400 $\mu\mu$, also für die ultraroten bis violetten Strahlen bestimmt; Cornu (100) untersuchte die Absorption besonders im ultravioletten Gebiet. Zur Messung des Absorptionsvermögens verwendete Pfund sehr dünne Schichten von $4{,}5 \cdot 10^{-5}$ mm Stärke, gleich $^1/_{10}$ der Wellenlänge des blauen Lichtes, die durch Kathodenzerstäubung niedergeschlagen worden waren. Die Selenschicht erschien im durchfallenden Lichte graubraun und im reflektierten Lichte bleifarbig. Die Messung erfolgte in üblicher Weise unter Verwendung des Spektrometers und Radiomikrometers. Wie aus Fig. 2 ersichtlich ist, steigt die

Absorption von den ultraroten bis zu den violetten Strahlen beständig an. Nach Cornu nimmt die Absorption mit abnehmender Wellenlänge im ultravioletten Gebiete noch weiter zu. Siehe auch Meier (335a) über Absorption an Metallen.

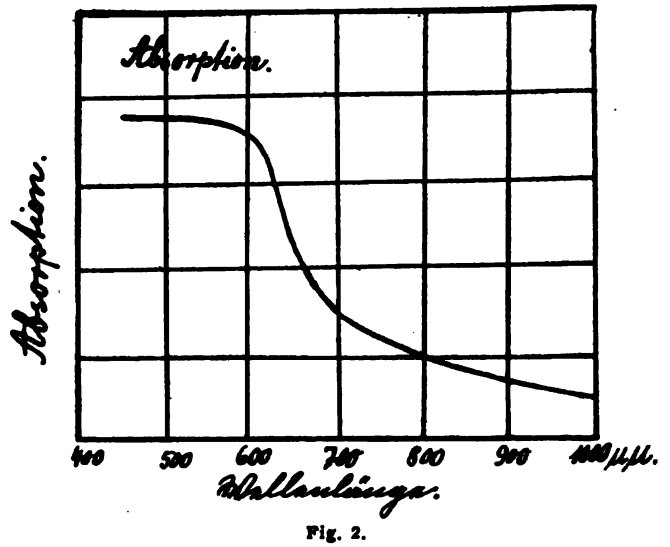


Fig. 2.

Zur Untersuchung des Reflexionsvermögens stellte Pfund (336) Spiegel aus metallischem Selen dadurch her, daß er eine heiße Glasplatte fest auf ein Stück Selen aufpreßte und dieses dann in den kristallinischen Zustand überführte. Nach der Abkühlung löste sich die Selenschicht vollkommen vom Glas und zeigte eine ausgezeichnete bleifarbene Oberfläche. Das Reflexionsvermögen bestimmte Pfund in der Weise, daß er das Verhältnis zwischen den Radiomikrometerausschlägen festlegte, wenn das Licht einmal von dem Selenspiegel, das andere Mal von einem Silberspiegel reflektiert wurde. Der Einfallswinkel betrug da in beiden Fällen 5^0. Kennt man das Reflexionsvermögen des Silbers, so erhält man ohne weiteres das wahre Reflexionsvermögen des Selens. Die Reflexion wies, wie man aus Fig. 3 ersieht, von 1000—400 μμ keine größeren Unterschiede auf, bei ungefähr 600 μμ trat ein Maximum ein. Dieses Resultat stimmt gut mit den älteren Beobachtungen von Nutting (193) überein, der ebenfalls ein Maximum der Reflexion in der Nähe von 600 μμ, bei ungefähr 590 μμ, fand (Fig. 4). Gegen den violetten Teil des Spektrums fällt das Reflexionsvermögen langsam ab, während sich im Ultraviolett diese Abnahme schneller fortsetzt. Nach Foersterling und Fréederichsz (436a) ist das Re-

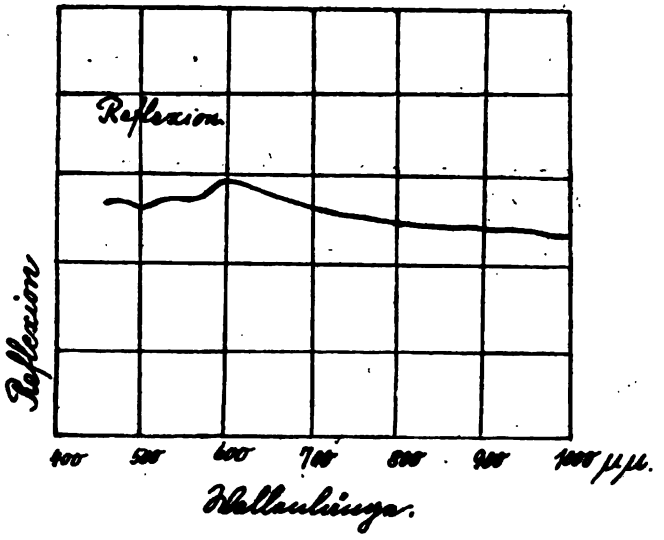


Fig. 3.

flexionsvermögen praktisch konstant von 289—740 μμ, während es bei größerer Wellenlänge variiert.

Der Brechungsindex des kristallinischen Selens beträgt nach Gripenberg (420) für $\lambda = 589$ μμ (orange-gelb) ca. 3,50.

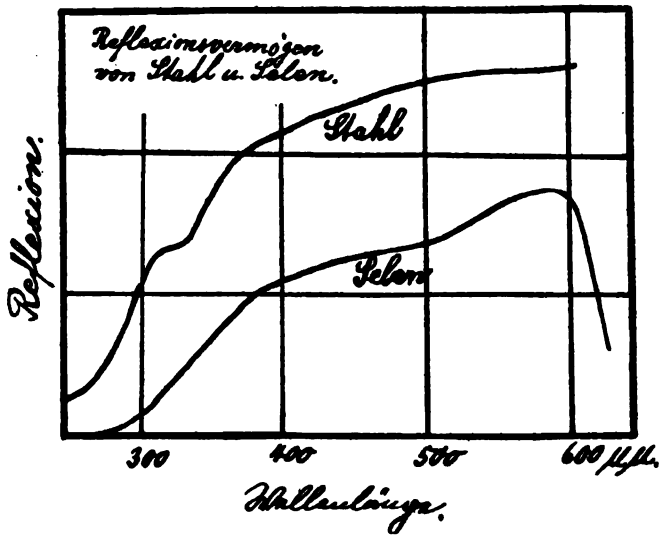


Fig. 4.

Kristallinisches Selen kann je nach der Herstellung stark porös sein (Bidwell 123, Weigel 235, Ries 383). Infolge der Porosität absorbiert das kristallinische Selen Wasser und okkludiert Gase.

Selen zeigt im dampfförmigen Zustand Fluoreszenz; die Dämpfe fluoreszieren nur im überhitzten Zustande und zwar im wesentlichen blau (Diestelmeier 418, 461, Steubing 430, Konen 422).

Ehrenhaft (500) hat kürzlich die Beobachtung gemacht, daß Körperchen mit etwa einem Milliontel Zentimeter Radius, wie man sie z. B. bei Verdampfung von Metall im elektrischen Lichtbogen erhält, von intensiven Lichtstrahlen je nach der Natur des Körpers teils in der Richtung der Strahlen, teils in entgegengesetzter Richtung fortgeführt werden. Das Licht hat also die Fähigkeit, die Körper nach ihrer Art zu scheiden; Ehrenhaft nennt diese Erscheinung Photophorese. Während Kügelchen aus Gold, Silber, Quecksilber in der Richtung des Lichtstrahles fortgeführt werden, bewegen sich Körperchen aus Schwefel, Salpetersäure u. a. in entgegengesetzter Bahn. Erstere werden deswegen als lichtpositiv, letztere als lichtnegativ bezeichnet. Außerdem gibt es lichtneutrale Körper, die vom Licht in ihrer Bewegung nicht beeinflußt werden. Ein eigentümlicher Spezialfall scheint nun beim Selen vorzuliegen. Durch Verdampfung im reinsten Argongas hergestellte Selenkörperchen verhalten sich außerorentlich stark lichtnegativ; jedoch entsteht durch Verdampfen bei höherer Temperatur eine Selensuspension, bei der sich einzelne Selenkörperchen orangeroter Farbe besonders intensiv lichtpositiv bewegen. Es scheint sich hier um eine allotrope Modifikation des Selens zu handeln, die sich lichtpositiv verhält. Die Ursache der Photophorese ist zur Zeit noch unbekannt; vielleicht hängt sie mit der Emission von Elektrizitätsträgern zusammen, worauf ich kürzlich hingewiesen habe (511).

Zahlreiche Versuche haben ergeben, daß Verunreinigungen und Feuchtigkeit des Selens die Ursache störender Erscheinungen sind; es ist daher auf die Reinigung und Trocknung des Selens besondere Sorgfalt zu verwenden. Als Verunreinigungen des Selens kommen hauptsächlich Schwefel, Quecksilber, Blei, Antimon, Wismut, Kupfer, Silber, Arsen, selenige Säure, Kieselsäure in Betracht. Die Reinigung geschieht im allgemeinen in der Weise, daß man das Selen mit Salpetersäure behandelt und die Lösung der gebildeten Selensäure mit Salzsäure verdampft. Dieselbe geht dabei in selenige Säure über und aus dieser wird durch schweflige Säure das Selen ausgefällt. Zur Trocknung bringt man das Selen gepulvert im Exsikkator einige Tage über Phosphorpentoxyd oder behandelt es mit sauerstoffreier trockener Kohlensäure.

R. Marc (282) hat auf die Reinigung und Trocknung des Selens besondere Sorgfalt verwendet, um bei seinen Versuchen zu eindeutigen klaren Resultaten zu gelangen. Er beschreibt sein Verfahren folgendermaßen: „Von dem bereits im Handel sehr rein erhältlichen Selenium praecipitatum Merck wurden etwa 100 g löffelweise in siedende Salpetersäure — spezifisches Gewicht 1,25 — eingetragen und dann so lange unter Umrühren erhitzt, bis vollständige Lösung erfolgt war und keine Ausscheidung von braunen Dämpfen mehr stattfand. Nach dem Erkalten wurde filtriert und die Lösung zur Trockene gedampft. Die so erhaltene selenige Säure wurde in Wasser gelöst, mit Salzsäure angesäuert und mit reiner wässeriger schwefliger Säure, bei späteren Versuchen mit reinem schwefligsaurem Alkali und Salzsäure das Selen ausgefällt. Nun wurde erhitzt, bis sich das Selen in Klumpen zusammengeballt hatte, die Lösung abgegossen, durch Dekantieren gewaschen, getrocknet, ganz fein gepulvert und mit heißem Wasser an der Saugpumpe gewaschen, bis die Waschwasser keine SO_4'- oder Cl'-Reaktionen mehr gaben und beim Verdampfen auf Platin keinen Rückstand hinterließen. Nach dem Trocknen bei 100° wurde die feingepulverte Masse in einem Verbrennungsrohr aus einem Porzellanschiffchen in Portionen von je 5 g im Kohlensäurestrom umsublimiert. Hierbei legt sich der größte Teil des aus dem Schiffchen herausdestillierten Selens ziemlich dicht hinter demselben nieder und fließt dort zu Klumpen zusammen, während ein kleinerer Teil durch das ganze Rohr mit fortgeführt wird und in Waschflaschen mit Wasser aufgefangen werden kann. Nur der erstere Teil wurde verwendet. Zum Loslösen des Selens vom Glasrohr wird nach dem Erkalten nochmals auf 120° erhitzt. Das so erhaltene umdestillierte Selen wurde nun feinstens gepulvert auf 100° erhitzt, um alles kristallinisch zu machen, und nun dauernd ca. 24 Stunden mit Schwefelkohlenstoff am Rückflußkühler extrahiert. Hierbei werden die letzten Reste etwa mit fortgerissenen Schwefels entfernt, während der Verlust an Selen nur sehr gering ist, da ja die kristallinische Form fast unlöslich ist. Nun wurde noch mit frisch destilliertem Äther und Alkohol und dann mit heißem Wasser und darauf wieder zur Entfernung des letzteren mit Alkohol und Äther an der Saugpumpe gründlich gewaschen und schließlich im Vakuum getrocknet. Es zeigte sich jedoch, daß das so erhaltene Selen selbst nach andauerndem Trocknen den Geruch nach Schwefelkohlenstoff schwach beibehielt. Obgleich nun nicht zu vermuten war, daß die Mengen des in irgendeiner Form zurückgehaltenen Schwefelkohlenstoffes wesentlich sein könnten, so wurde dennoch die Extraktion mit letzterem aufgegeben. Es zeigte sich, daß die Präparate auch ohne diese Extraktion schwefelfrei wurden. Ferner stellte

sich heraus, daß die mit Wasser, Alkohol und Äther gewaschenen Proben sich an der Luft recht bedeutend, aber auch im Vakuum des Exsikkators noch merklich oxydierten, und es wird später dargetan werden, daß diese Oxydspuren großen Einfluß besitzen. Es ließ sich aber durch Umdestillieren im CO_2-Strom das Oxyd leicht entfernen, da es flüchtiger ist als das Selen, und es wurde deshalb bei späteren Versuchen unmittelbar vor jeder Messung die geringe zu derselben erforderliche Menge nochmals im Kohlensäurestrom umsublimiert. War das Ausgangsmaterial für die Darstellung reinen Selens weniger rein, so ging der Auflösung in Salpetersäure eine erstmalige Umsublimation im CO_2-Strom voraus. Sodann wurde die selenige Säure mit $Ba(OH)_2$ versetzt, um etwaige Schwefelsäure zu fällen, filtriert, eingedampft und nach dem Trocknen im Sauerstoffstrom so oft umsublimiert, bis sie absolut weiß war und schließlich das aus derselben erhaltene Selen nach der Reinigung mit Wasser usw. vor den jedesmaligen Versuchen, wie oben beschrieben, nochmals im CO_2-Strom umsublimiert."

II. Das Verhalten der Selenformen Se_0, Se_1, Se_2 gegen Wärme.

Hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit teilen wir das Selen in drei Formen Se_0, Se_1 und Se_2 ein. Die Selenform Se_0 ist ein Nichtleiter der Elektrizität; sie umfaßt das amorphe schwarze und rote Selen, das rote kristallinische Selen und das aus Kaliumselenid kristallisierte graue Selen. Die Selenformen Se_1 und Se_2 sind Elektrizitätsleiter; zu ihnen gehört das durch Erhitzungsprozesse und das durch Behandlung mit Chinolin gewonnene graukristallinische Selen. Für technische Zwecke haben fast nur die Selenformen Se_1 und Se_2 Bedeutung; wir wollen uns im folgenden mit ihrer Herstellung aus der Selenform Se_0 und mit ihrem merkwürdigen Verhalten gegen Wärme eingehend beschäftigen.

Erwärmt man schwarzes amorphes Selen recht langsam, so erweicht es in der Gegend von 50—60° C. Die mikroskopische Untersuchung von dünnen Selenschichten ergab, daß in der durchsichtigen Masse bei 60° kleine schwarze Fasern entstehen und daß mit Temperatursteigerung deren Zahl zunimmt (Pochettino 338). In der Gegend von 90° C beginnt das Selen unter starker Wärmeentwicklung zu einer mattgrauen kristallinischen Masse zu erstarren. Die Kristallisationstemperatur, d. h. die Temperatur, bei der die Kristallisation einsetzt, hängt von der Geschwindigkeit der Erhitzung und der Reinheit des Selens ab. Je schneller die Temperatur

erhöht wird, um so höher liegt die Kristallisationstemperatur. Die Reinheit des Selens ist nicht bloß auf die Lage der Kristallisationstemperatur, sondern auch auf die Kristallisationsgeschwindigkeit von Einfluß. Je reiner das Material, desto tiefer liegt die Kristallisationstemperatur und desto schneller geht die Kristallisation vor sich (Marc 282). Recht reine Präparate kristallisieren bereits kurz vor 100° C innerhalb weniger Minuten, während unreine Präparate selbst bei wesentlich höherer Temperatur erst nach längerer Zeit in die kristallinische Modifikation übergehen. So hat Marc an ganz reinen Selenpräparaten schon bei einer nur ½ bis 2 Minuten dauernden Erhitzung auf ca. 100° vollständige Kristallisation erzielt, während käufliches Stangenselen erst bei 160° zu kristallisieren begann und nach Verlauf von 50 Minuten völlig kristallisiert war.

Die Kristallisation des Selens geht unter bedeutender Wärmeentwicklung vor sich. Die Größe der Wärmeentwicklung und die Heftigkeit des Vorganges zeigt uns deutlich ein Versuch von Regnault (8). Dieser hat Selen in einem Bad von 100° erhitzt; dabei entwickelte es plötzlich bei 93° eine solche Wärmemenge, daß seine Temperatur auf 214° stieg. Die direkt entwickelte Wärmemenge beim Übergang des amorphen Selens in die kristallinische Modifikation, die sogenannte Kristallisationswärme, beträgt nach Regnault 11,8, nach Petersen 14,3 K. (8, 113). Nach dem Einsetzen der Kristallisation steigert sich also die Temperatur infolge der im Selen entwickelten Wärmemenge explosionsartig, so daß die Selenmasse unter Umständen zum Schmelzen kommt, wenn nicht rasch genug Wärme an die Umgebung abgeführt wird. Tatsächlich kann man denn auch amorphes Selen zum Schmelzen bringen, ohne daß Kristallisation eintritt, wenn man es genügend rasch erwärmt.

Über die Wärmeentwicklung während der Kristallisation hat Marc (282) sehr interessante Versuche gemacht. Er brachte ein Röhrchen mit Selen in ein Kupfergranalienbad, das sehr gleichmäßig und langsam erwärmt wurde. Der Temperaturunterschied zwischen Selen und Bad wurde dadurch gemessen, daß die eine Lötstelle eines Thermoelementes in die Selenmasse, die andere in das Kupfergranalienbad eintauchte. Es wurden mehrere Versuche mit verschiedener Erhitzungsgeschwindigkeit angestellt. Die dabei auftretenden Wärmetönungen sind aus Fig. 5 ersichtlich. Auf der Abszisse sind die Temperaturen, auf der Ordinate die Differenzen Selentemperatur — Badetemperatur, ausgedrückt in Skalenteilen der Galvanometerausschläge, aufgetragen. Kurve I zeigt uns das Verhalten bei langsamem Erwärmen in 6 Stunden 25 Minuten von 20° bis zum Schmelzpunkt, Kurve II bei raschem Erwärmen in 2 Stunden, Kurve III das letzte Stück einer außerordentlich

langsam erwärmten Probe. Die Kurve I für langsames Erhitzen weist ein plötzliches Ansteigen bei ca. 90° und ein Maximum bei 100° auf; bei 195° biegt die Kurve nochmals aus und erreicht ein Maximum bei 210°. Bei rascherem Erwärmen tritt das 1. Maximum erst bei einer um ca. 30° höheren Temperatur ein. Das 2. Maximum scheint recht konstant zu sein, denn es liegt in allen drei Fällen bei der gleichen Temperatur.

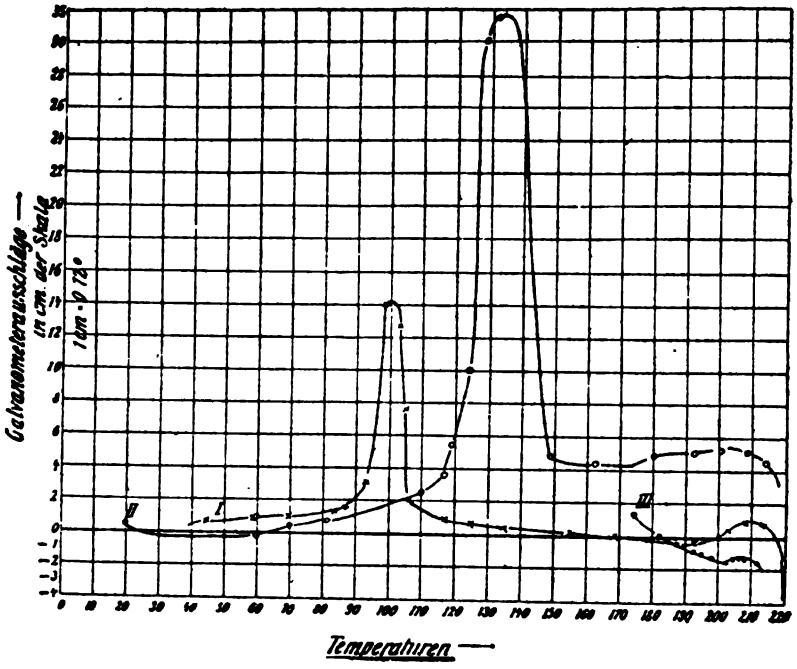


Fig. 5.

Es findet also nicht bloß beim Eintreten der Kristallisation, sondern auch kurz vor dem Schmelzpunkt bei 200 bis 210° C eine größere Wärmeabgabe statt. Die zweimalige verschiedene Wärmeabgabe ist ein Zeichen dafür, daß hier zwei Umwandlungen vor sich gehen. Das erste Maximum entspricht dem Übergang der amorphen Selenform in die kristallinische. Daß diese Form aber nicht die stabilste ist, zeigt das 2. Maximum, das einer Umwandlung in eine beständigere Form entspricht. Die 2. Umwandlung vollzieht sich nur ganz allmählich, sie kann erst nach einer Erhitzungszeit von vielen Tagen als annähernd vollständig angesehen werden. Erhitzt man Selen, das auf 210° erwärmt und dann gekühlt worden war, nochmals gegen 210°,

so läßt sich die erste Umwandlung nicht mehr, wohl aber die zweite feststellen, ein Zeichen, daß diese nur allmählich vor sich geht (Pochettino 338). Alle Versuche zeigen, daß bei raschen Temperaturveränderungen Wärmevorgänge nicht richtig übersehen werden können, da das Selen große Neigung zu Überschreitungen und Unterkühlungen hat. Es empfiehlt sich daher in allen Fällen langsam zu erwärmen.

Nach Pochettino (338) ist die Temperatur, bei der die 2. Umwandlung eintritt, unabhängig von der Erhitzungsgeschwindigkeit; sie betrug in allen Fällen 204—206°, was mit den Versuchen von Marc gut übereinstimmt. Ich (315) habe gefunden, daß die bei den beiden Umwandlungen eintretende Wärmeabgabe mit einer Feuchtigkeitsabgabe verbunden ist.

Die von Marc durch Wärmetönungen gefundenen 2 Selenformen der graukristallinischen Modifikation sind offenbar die gleichen, die wir oben (S. 11) schon an ihrem verschiedenartigen Aussehen erkannt haben. Besonders charakteristisch aber für die beiden Selenformen ist ihre verschiedene Leitfähigkeit für den elektrischen Strom.

Da der spezifische Widerstand des graukristallischen Selens sehr hoch ist, muß man zu den Untersuchungen über elektrische Leitfähigkeit möglichst dünne Selenschichten verwenden. Man schmilzt daher das Selen entweder zwischen 2 Drähten, die in geringer Entfernung zu einander parallel laufen, oder zwischen 2 Metallplatten ein. Zwischen diesen beiden Elektroden läßt man dann den elektrischen Strom durch die dünne Selenschicht übergehen.

Erhitzt man ein derartiges Selenpräparat aus amorphem Selen in einem Luft- oder Ölbad, so beobachtet man von Zimmertemperatur bis 60° keine Spur von Leitfähigkeit (Selenform Se_0). Von 60° an läßt sich eine geringe Leitfähigkeit feststellen, die bis in die Gegend von 90 noch schwach zunimmt. Nimmt man ein auf 60—90° erwärmtes Präparat aus dem Bad heraus und kühlt es ab, so besitzt es das schwarze Aussehen des amorphen Selens und zeigt keine Spur von Leitfähigkeit mehr. Setzt man die Erhitzung über 90° fort, dann beginnt das amorphe Selen in die mattgraue kristallinische Modifikation überzugehen; damit nimmt auch die Leitfähigkeit weit schneller zu als vorher. Wird jetzt das Selenpräparat aus dem Bade genommen und gekühlt, so verringert sich zwar die Leitfähigkeit, aber das Selen bleibt nun auch im abgekühlten Zustande leitend. Von ca. 125° an beginnt das Leitvermögen stärker anzusteigen, nimmt dann mit Temperaturerhöhung immer größere Werte an und erreicht schließlich in der Nähe des Schmelzpunktes bei 217° das Maximum der Leitfähigkeit, um mit dem Eintreten des Schmelzens rasch abzufallen. Jenseits des Schmelzpunktes nimmt die Leitfähigkeit

bis gegen 250° noch weiter ab, erholt sich aber nachher wieder langsam. Fig. 6 gibt ein Bild der Leitfähigkeitszunahme vom Eintritt der Kristallisation bis gegen 200° bei langsamer Erhitzung.

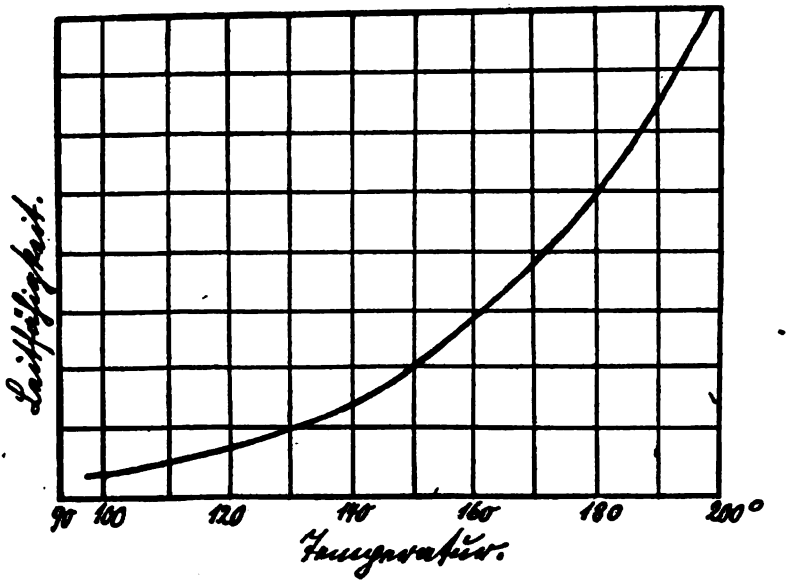


Fig. 6.

Selenpräparate, die nur auf niedrige Temperaturen (100 bis 170°) erhitzt wurden, zeigen nach der Abkühlung bei Zimmertemperatur beträchtlichen Widerstand. Der Temperaturkoeffizient des Widerstandes dieser Selenform, die wir mit Se_1 bezeichnen wollen, ist negativ d. h. der Widerstand nimmt mit Temperaturerhöhung wie bei der Kohle beständig ab. Die geringe Leitfähigkeit läßt sich durch Verunreinigung des Selens wesentlich steigern. Marc behauptet nun, daß das Selen der Form Se_1 nicht nur eine geringe, sondern praktisch gar keine Leitfähigkeit besitzt und daß die Leitfähigkeit dieser Form auf Verunreinigungen durch geringe Mengen Selendioxyd zurückzuführen ist. Als nämlich das Selen in einem von Sauerstoff befreiten trockenen Kohlensäurestrom präpariert und untersucht wurde, zeigte es fast gar keine Leitfähigkeit mehr, während es durch geringen Zusatz eines Elektrolyten recht gute Leitfähigkeit erhielt. Mit dieser Behauptung, die auch Bidwell (84, 123) aufstellte, ging nun Marc offenbar etwas zu weit. Tatsächlich besitzt die Selenform Se_1 elektrische Leitfähigkeit, die bei niedrigerer Erhitzungstemperatur allerdings gering ist, mit der Erhöhung der Erhitzungstemperatur aber zunimmt.

Wird ein Selenpräparat auf 180—200 °C erhitzt, so wächst die Leitfähigkeit rasch. Hält man die Temperatur längere Zeit konstant, so erfolgt eine weitere Zunahme der Leitfähigkeit und zwar steigt diese erst rasch, dann immer langsamer bis zu einem Maximum an. Dieses Maximum wird umso früher erreicht, je höher die konstante Erhitzungstemperatur ist. Bei einer Temperatur von 210 ° ist der Vorgang in 12 bis 24 Stunden, bei 180 ° dagegen erst in drei Tagen beendet (Marc 282).

War ein Selenpräparat auf einer Temperatur von mehr als 200 ° solange gehalten worden, bis die Leitfähigkeit ihr Maximum erreicht hatte, so steigt dessen Leitfähigkeit bedeutend an, wenn man es rasch auf Zimmertemperatur abkühlt. Fig. 7 zeigt die Leitfähigkeitszunahme eines auf

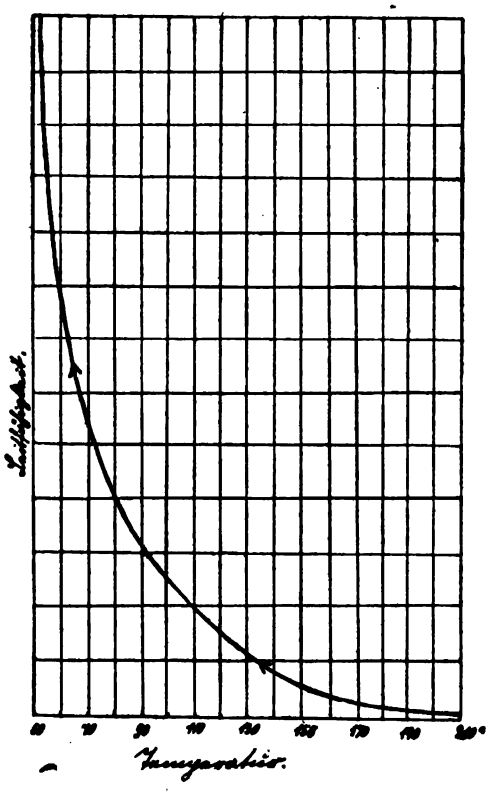


Fig. 7.

210 ° erhitzten Präparates von Marc (282), das in 12 Minuten auf 92 ° abgekühlt wurde., Die Zunahme der Leitfähigkeit bei der Abkühlung ist ein Beweis dafür, daß wir es hier mit einem Metall zu tun haben. Leider behält das Präparat bei

Zimmertemperatur diese hohe Leitfähigkeit nicht bei, vielmehr sinkt diese schon kurz nach der Abkühlung erst rasch, dann langsam auf einen niedrigeren Wert herab. Die Zeit, innerhalb der dieses Minimum der Leitfähigkeit erreicht wird, ist je nach dem Erhitzungsprozeß und der Reinheit des Selens verschieden. Fig. 8 gibt uns ein Bild von der Leitfähigkeitsabnahme eines rasch gekühlten Präparates, wie ich sie innerhalb 24 Stunden nach der Kühlung beobachtet habe. Im all-

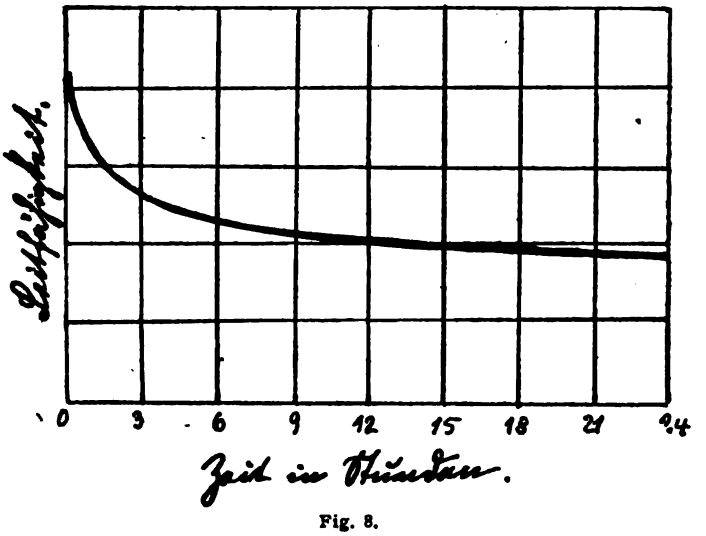


Fig. 8.

gemeinen nimmt ein derartig behandeltes Präparat innerhalb einer Woche eine annähernd konstante Leitfähigkeit an. Es ist aber nicht ausgeschlossen, daß im Laufe von Wochen und Monaten infolge innerer Umlagerungen im Selen noch weitere Änderungen der Leitfähigkeit bezw. des Widerstandes sich zeigen (S. 34).

Ein Selenpräparat, das auf 200—215° C bis zur Erreichung der maximalen Leitfähigkeit erhitzt und dann rasch gekühlt wurde, besitzt einen positiven Temperaturkoeffizienten des Widerstandes d. h. sein Widerstand nimmt mit Erwärmung beständig zu; es verhält sich also wie ein Metall. Wir wollen daher im folgenden diese Selenform als metallisches Selen oder Se_2 bezeichnen.

Die beiden Selenformen Se_1 und Se_2 des graukristallinischen Selens, die sich schon bei dem Erhitzungsprozeß durch Wärmeabgabe bemerkbar machen, unterscheiden sich also nicht bloß äußerlich durch ihr Aussehen, sondern auch durch ihre verschiedenartige elektrische Leitfähigkeit. Es

gelingt indes nicht leicht, die Selenform Se_2 rein darzustellen, wie die folgenden Ausführungen zeigen werden.

Setzt man den Erhitzungsprozeß auf 200—210° nicht bis zur vollständigen Erreichung der maximalen Leitfähigkeit fort und kühlt man nicht rasch genug ab, so zeigen die Selenpräparate bei der Abkühlung und bei Zimmertemperatur recht verschiedenartige Leitfähigkeit. Wird z. B. das Maximum der Leitfähigkeit erreicht, aber nicht rasch genug gekühlt, so findet nur eine mäßige Zunahme der Leitfähigkeit infolge der Abkühlung statt. Kühlt man aber ganz langsam, so tritt während der Abkühlung erst eine Zunahme, dann eine Abnahme der Leitfähigkeit ein. Stellt man die Leitfähigkeitsänderungen während der Abkühlung durch eine Kurve dar,

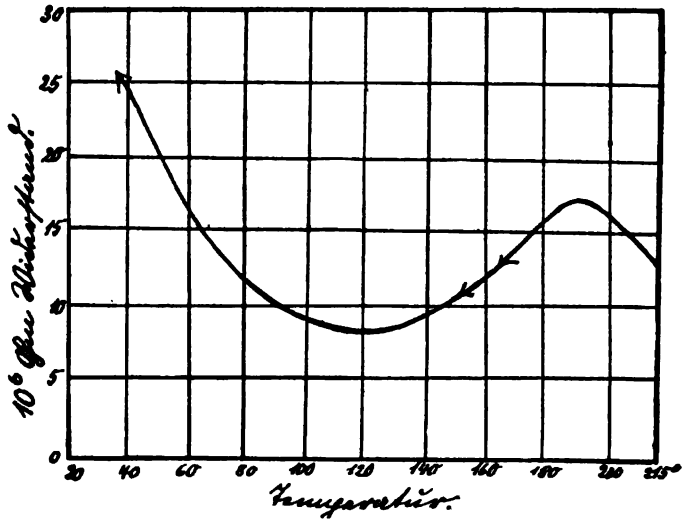


Fig. 9.

so weist diese ein Maximum auf. Diese Lage des Maximums wechselt mit der Geschwindigkeit der Abkühlung. Große Unregelmäßigkeiten treten auf, wenn während des Erhitzungsprozesses die maximale Leitfähigkeit gar nicht erreicht war und langsam abgekühlt wird; in diesem Falle zeigen die Abkühlungskurven Maxima und Minima in verschiedenen Lagen; es wechseln also dann positive und negative Temperaturkoeffizienten des Widerstandes innerhalb gewisser Temperaturbereiche mit einander ab. Die Fig. 9—11 veranschaulichen die Widerstandsänderungen von Präparaten, die nach dem Erhitzungsprozeß langsam gekühlt wurden, nach Beobachtungen von Schrott (258). Fig. 9 zeigt uns das Verhalten eines Präparates, das 5 Stunden auf 210—215° C gehalten worden

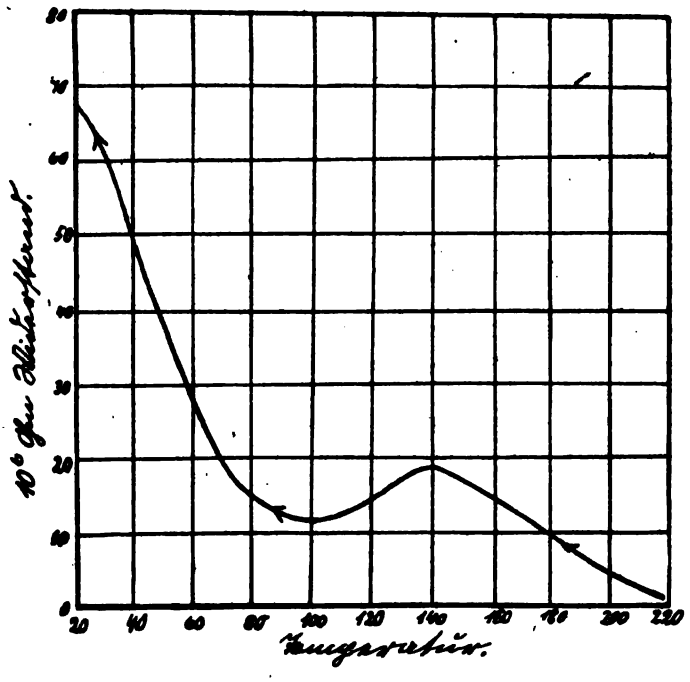


Fig. 10.

war, bei langsamer Kühlung. Die Widerstandskurve weist bei 185 ° ein Maximum, bei 120 ° ein Minimum auf; im Bereiche von 185—120 ° C herab war also der Temperaturkoeffizient des Widerstandes positiv, sonst negativ. Das zweite Präparat, das bis 210 ° erhitzt worden war, besaß einen positiven Temperaturkoeffizienten des Widerstandes zwischen 140 und 100 ° (Fig. 10). Ein drittes Präparat, das nur kurze Zeit auf 200 bis 215 ° gehalten worden war, zeigte nur zwischen 50 und 30 ° C metallisches Verhalten (Fig. 11).

Erwärmt man derartige Präparate einige Zeit nach der Herstellung noch einmal langsam auf ca. 210 °, so liegen bei der darauf folgenden langsamen Abkühlung die Maxima des Widerstandes bei tieferen Temperaturen als bei der Erwärmung. Fig. 12 veranschaulicht das Verhalten eines Präparates von Schrott (258) bei zweimaliger Erwärmung und Abkühlung. Beide Male zeigte sich bei Erwärmung ein positiver Temperaturkoeffizient des Widerstandes bis 130 ° C, während bei Abkühlung dieser Umkehrpunkt erst bei 90 ° C eintrat. Auch die absoluten Werte des Widerstandes differierten beträchtlich von einander. Ein genaues Zusammenfallen der Erwärmungs- und Abkühlungskurve kann nicht erwartet werden, da infolge der nochmaligen Erwärmung neuerdings in-

nere Umlagerungen im Selen stattfinden, so daß der Zustand des Selens während der Erwärmung ein anderer ist als bei der folgenden Kühlung. Dazu kommt, daß die wahre Temperatur des Selens mit der beobachteten sehr schlecht übereinstimmt, wenn die Temperaturänderung nicht ganz langsam vor sich geht; will man einigermaßen zuverlässige Resultate erhalten, so ist nicht bloß eine äußerst langsame Temperaturänderung, sondern auch längeres Konstanthalten auf jeder Beobachtungstemperatur nötig, da das Selen zu Überhitzungen und Unterkühlungen große Neigung hat. Ganz allgemein können wir feststellen, daß die Wendepunkte bei der Abkühlung niedriger liegen als bei der vorausgegangenen Erwärmung.

Von großem Einfluß auf den Temperaturkoeffizienten des Widerstandes sind Verunreinigungen des Selens, insbesondere Feuchtigkeit und Metallzusätze. Auch erteilen beide dem Selen eine wesentlich höhere Leitfähigkeit. Wir wollen zuerst den Einfluß der Feuchtigkeit betrachten.

Erwärmt man ein amorphes Selenpräparat aus reinem, recht trockenem Material von Zimmertemperatur recht langsam gegen den Schmelzpunkt, so nimmt es in der Gegend von 90° mit dem Übergang in die kristallinische Form elektrische Leitfähigkeit an, die mit Temperaturzunahme ungefähr in der aus Fig. 6 ersichtlichen Weise anwächst. Hält man die Tem-

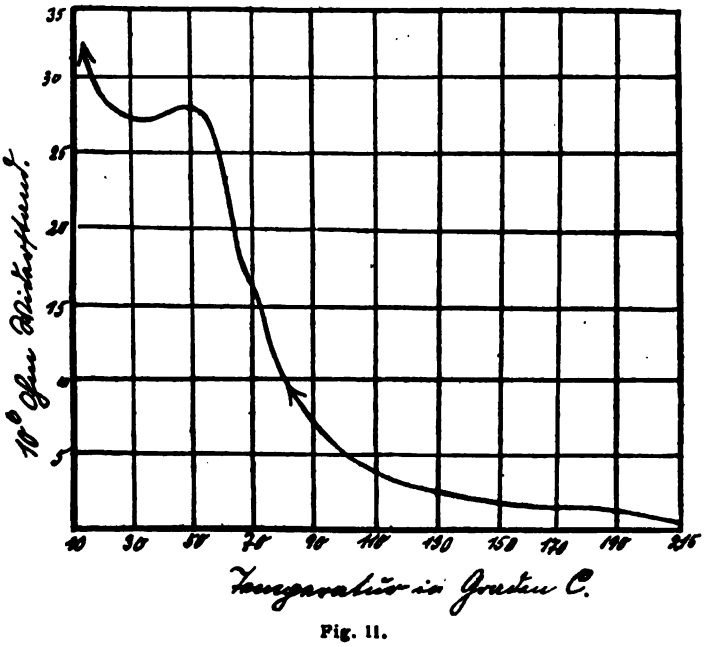


Fig. 11.

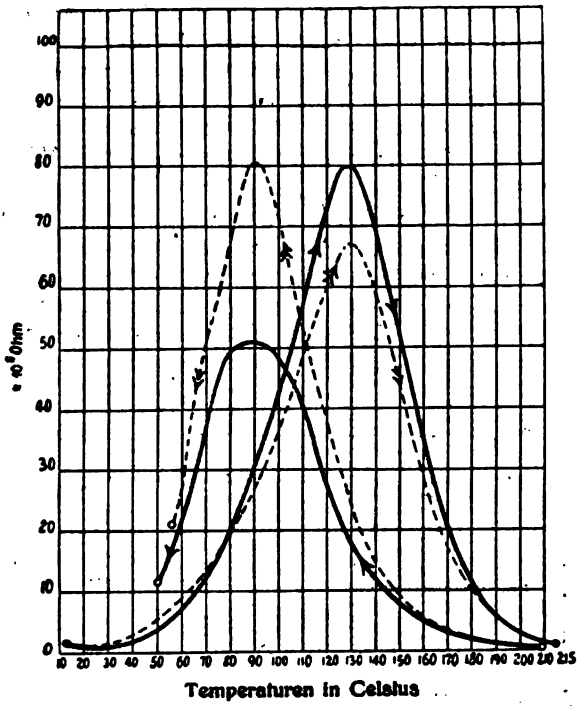


Fig. 12.

peratur einige Minuten konstant, so macht sich fortgesetzt eine Leitfähigkeitszunahme bemerkbar. Ganz anders verhält sich feuchtes Selen. Dieses zeigt bei Konstanthalten der Temperatur innerhalb gewisser Temperaturbereiche und zwar zwischen 110 und 130° C und 200—217° C eine Leitfähigkeitsabnahme (Siemens 26, Ries 171, Marc 282). Die Erscheinung beruht auf einer Verdampfung von Feuchtigkeit. Da letztere dem Selen eine höhere Leitfähigkeit erteilt, als ihm eigentlich zukommt, bedeutet natürlich jeder Verlust an Feuchtigkeit zugleich eine Leitfähigkeitsabnahme (Bidwell 77, Marc 282, Ries 316). Man kann sich von der Richtigkeit dieser Erklärung dadurch überzeugen, daß man einem trockenen Selenpräparat, das sich normal verhält, nach vorherigem Umschmelzen etwas Feuchtigkeit beimengt, worauf sich die erwähnte Erscheinung einstellt. Es ist von besonderem Interesse, daß die Leitfähigkeitsabnahme bezw. Feuchtigkeitsabgabe innerhalb derselben Temperaturbereiche auftritt, bei denen die Ausbildung der Selenformen Se_1 und Se_2 unter beträchtlicher Wärmeabgabe (S. 23) erfolgt (Ries 316). Wir sehen daraus, daß die Wärmeabgabe bei der Kristallisation feuchter Präparate von einer Feuchtigkeitsabgabe begleitet ist.

Spuren von Feuchtigkeit scheinen auf die Ausbildung des positiven Temperaturkoeffizienten des Widerstandes von günstigem Einfluß zu sein. So zeigt insbesondere das durch längeres Stehenlassen in Chinolin kristallisierte Selen schon nach kurzer Erhitzung über 200° innerhalb weiter Grenzen einen positiven Temperaturkoeffizienten des Widerstandes (Schrott 258).

Dagegen ist ein größerer Feuchtigkeitsgehalt sehr schädlich für ein Selenpräparat. Besitzt ein Präparat nach der Abkühlung noch größere Feuchtigkeit, so nimmt die Leitfähigkeit bei Durchgang eines Stromes erst rasch, dann langsam gegen ein Minimum ab. Fig. 13 zeigt die Abnahme der Stromstärke für ein solches Präparat, das 15 Minuten mit einem Akkumu-

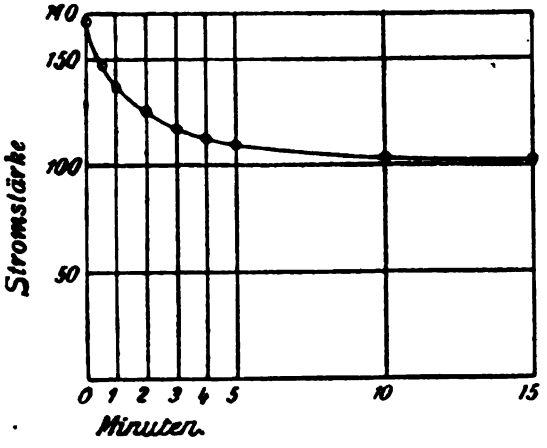


Fig. 13.

lator von 2 Volt verbunden war. Wir werden diese Erscheinung, die in erster Linie durch das Auftreten eines entgegengesetzt gerichteten Polarisationsstromes und nur zum geringen Teile durch Verdampfung von Feuchtigkeit infolge der Stromwärme sich erklärt, später eingehend behandeln (S. 152).

Die Tatsache, daß an feuchten Präparaten das Maximum der Leitfähigkeit beim Abkühlen leichter auftrat und daß die Leitfähigkeitsabnahme bei konstanter Temperatur etwas rascher erfolgte als bei reinen Proben, veranlaßten Marc (282) noch wirksamere Katalysatoren zu suchen. Er fand, daß die edleren Metalle, insbesonders das Silber die Umwandlung in metallisches Selen ganz besonders beschleunigen. Selbst ganz geringe Silberbeimengungen bewirkten noch, daß bei raschem Abkühlen starke Maxima auftraten und bei Zimmertemperatur bereits nach wenigen Stunden die Leitfähigkeit einen annähernd

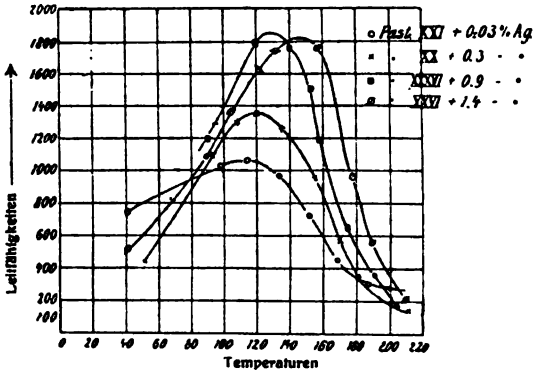


Fig. 14.

konstanten Wert annahm. Die Abkühlungskurven in Fig. 14 ermöglichen einen Vergleich der Präparate mit verschiedenen Silberzusätzen von 0,03 bis 1,4%. Die Maxima treten um so schärfer und um so früher auf, je größer der Silberzusatz ist. Von anderen Metallen erwies sich Platin recht gut wirksam, Kupfer wenig, Eisen gar nicht.

Die bei der Abkühlung auftretenden Wendepunkte, d. h. Maxima und Minima des Widerstandes, verschieben sich nach der Abkühlung gewöhnlich rasch und zwar nach tieferen Temperaturen, auch wird der Temperaturbereich, innerhalb dessen der Temperaturkoeffizient des Widerstandes positiv war, meist kleiner. Siemens (26) schloß daraus, daß bei Zimmertemperatur eine allmähliche Rückbildung der Selenform Se_2 in Se_1 sich vollzieht. Die von Siemens aufgestellte Behauptung, daß rasche Abkühlung unter Null Grad die Existenz des metallischen Selens ganz vernichte, ist durch Schrott (258) und mich (316) widerlegt worden. Ich habe gefunden, daß die Wendepunkte schon nach einigen Tagen eine annähernd konstante Lage annehmen und auch durch größere Temperaturschwankungen nicht mehr wesentlich beeinflußt werden, solange die höchste Temperatur unter 90° bleibt; bei höheren Temperaturen könnte selbstverständlich eine innere Umbildung der Selenstruktur eintreten, was mit Leitfähigkeitsänderungen verbunden wäre. So besitze ich ein Präparat mit einem Maximum des Widerstandes bei + 23° C, welches sich seit 15 Jahren nicht verschoben hat, obwohl das Präparat wiederholt zu Versuchszwecken benutzt worden ist. Fig. 15 veranschaulicht die merkwürdige Leitfähigkeitskurve jenes Präparates, die nicht weniger als 4 Wendepunkte aufweist; es wechselt also ein negativer Temperaturkoeffizient wiederholt mit einem positiven ab.

Von besonderer Bedeutung für die Elektrotechnik ist die Frage, innerhalb welcher Zeit ein Selenpräparat einen k o n-

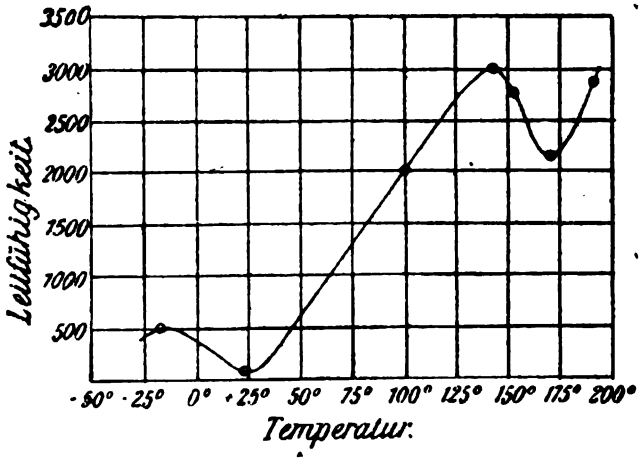


Fig. 15.

stanten Widerstand annimmt. Fig. 8 zeigte uns bereits die Leitfähigkeitsabnahme während des ersten Tages nach der Herstellung für ein Präparat, das über 200° erhitzt und rasch gekühlt worden war. Fig. 16 bringt nun die Widerstandszunahme für ein gleiches Präparat innerhalb 20 Tagen nach der Herstellung. Die größte Widerstandsveränderung erfolgte am ersten Tage, nach 10 Tagen war sie nicht mehr von großer Bedeutung, doch war selbst nach 20 Tagen ein konstanter Wert noch nicht erreicht (Ries 315).

Einen sehr interessanten Versuch hat Luterbacher (359) angestellt, der eine Zelle 5 Monate in eine Kühlvorrichtung von Null Grad eingeschlossen hat. Die Ergebnisse seiner

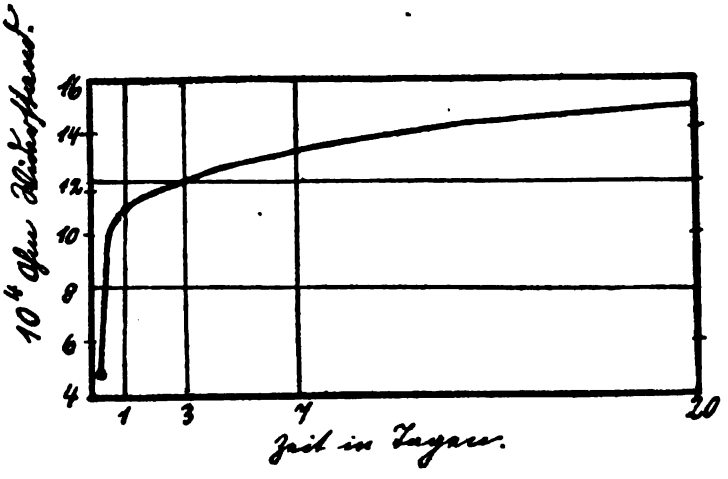


Fig. 16.

Untersuchung sind aus Fig. 17 ersichtlich. Erst nach drei Wochen erreichte der Selenwiderstand einen annähernd konstanten Wert, um nachher Schwankungen von mehreren Hundert Ohm um eine Gleichgewichtslage auszuführen. Wir heißen diese Erscheinung Inkonstanz des Widerstandes. Die Inkonstanz beruht auf einer allmählich sich vollziehenden Umlagerung im Innern des Selens. Sie macht sich nicht bloß nach Monaten noch durch kleinere Schwankungen, sondern manchmal auch ganz unerwartet nach langer Zeit durch große

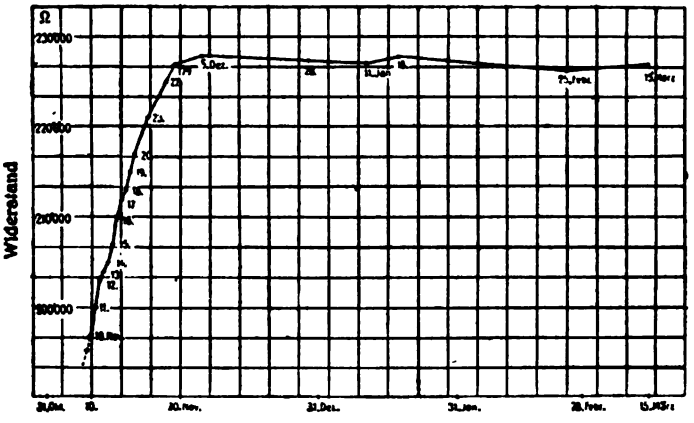


Fig. 17.

Unregelmäßigkeiten bemerkbar. Die Ursache dieser Erscheinung ist noch nicht vollständig aufgeklärt; auch sind wir nicht imstande, diesen schweren Fehler des Selens durch geeignete Konstruktion vollständig zu beseitigen, doch scheinen kleine Metallzusätze die Einstellung in eine Gleichgewichtslage bezw. die Annäherung an einen möglichst konstanten Wert des Widerstandes zu beschleunigen.

Marc (282) beobachtete nämlich, daß ganz reines Selen selbst viele Tage nach der Kristallisation noch keineswegs einen konstanten Widerstand angenommen hatte, während die mit Metallzusätzen versehenen Präparate schon nach wenigen Stunden sich einer Gleichgewichtslage näherten. Die Einstellung in das Gleichgewicht wird besonders durch die edleren Metalle, vor allem Silber in Mengen von 0,01—0,1%, beschleunigt. Diese Tatsache ist von besonderer Wichtigkeit für den Bau von Selenpräparaten, die in der Elektrotechnik Verwendung finden sollen.

An einem derartigen mit 1% Silber versetzten Präparat, das konstante Leitfähigkeit bei Zimmertemperatur angenommen hatte, machte Marc (282) einen sehr interessanten Ver-

such, der mehrere Wochen in Anspruch nahm. Er erwärmte dasselbe von 26° bis 201° und kühlte es dann wieder bis auf 19° ab. Dabei wurde jedoch die Temperatur nicht allmählich und gleichmäßig, sondern in Zwischenräumen von ca. 30° geändert und solange konstant gehalten, bis der Widerstand einen annähernd konstanten Wert angenommen hatte. Dies dauerte in allen Fällen sehr lange, bei niedrigen Temperaturen mehrere Tage, bei 201° noch 17 Stunden. Die bei den einzelnen Beobachtungstemperaturen festgestellten Werte der Leitfähigkeit sind in Fig. 18 wiedergegeben. Wir sehen ein

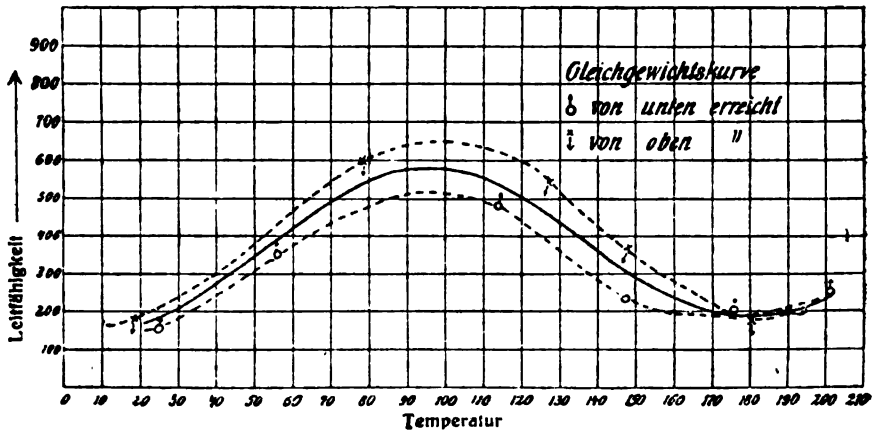


Fig. 18.

Maximum der Leitfähigkeit bei ca. 100° C für die Erwärmungs- und Abkühlungskurve. Beide Kurven haben so ziemlich die gleiche Form, nur weist die Erwärmungskurve viel kleinere Werte der Leitfähigkeit auf, als die Abkühlungskurve. Die bei der Erwärmung beobachteten Werte sind offenbar zu niedrig, die bei der Abkühlung gefundenen zu hoch. Aus der Differenz der beiden punktierten Kurven ersieht man, daß die Leitfähigkeit bei Temperaturänderungen Hysteresiserscheinungen bezw. große Trägheit zeigt und daß das Selen das wahre Gleichgewicht erst nach sehr viel längerer Zeit erreicht. Die mittlere, stark ausgezogene Kurve stellt offenbar die wahre Gleichgewichtskurve für das Selenpräparat dar. Marc nimmt daher an, daß für alle Temperaturen nicht eine bestimmte Form stabil sei, sondern ein Gleichgewicht zwischen 2 Formen, das mit der Temperatur verschiebbar ist. Die Selenform, die durch Erhitzung auf Temperaturen über 200° gefunden wird, ist nach Marc nicht einheitlich, sondern vermutlich eine feste Lösung zweier im verschiebbaren Gleichgewicht befindlichen Formen.

Die vorstehenden Ausführungen lassen erkennen, daß die scheinbaren Widersprüche, wie wir sie in den Arbeiten der einzelnen Forscher bezüglich der elektrischen Leitfähigkeit des Selens finden, sich in einfacher Weise durch die verschiedenartige Herstellung der Präparate erklären. Je nach der Höhe der Erhitzungstemperatur, der Dauer der Erhitzung, der Art der Abkühlung, der Reinheit des Materials und der Entfernung von der Gleichgewichtslage muß die Leitfähigkeit und der Temperaturkoeffizient des Widerstandes verschieden ausfallen.

Nach Siemens (26) läßt sich die Selenform Se_1 durch nochmalige Erhitzung nicht mehr in metallisches Selen überführen. Dies trifft nach Schrott (258) nicht vollständig zu. Das Auftreten des positiven Temperaturkoeffizienten des Widerstandes wird zwar durch eine Unregelmäßigkeit im Erhitzungsprozeß verzögert, es läßt sich aber immer durch entsprechend lange Erhitzung auf mehr als 200° die Selenform Se_1 wenigstens zum Teil in Se_2 umwandeln.

Um zu untersuchen, welchen Einfluß vorherige Kristallisation bei niedrigerer Temperatur auf die Leitfähigkeitsänderungen während des Erhitzungsprozesses ausübt, habe ich (315) vier amorphe Präparate in gleicher Weise hergestellt und zwei davon (II und II') bei 140° in die kristallinische Modifikation übergeführt. Dann wurden ein amorphes (I) und ein kristallinisches (II) Präparat im gleichen Heizofen langsam erhitzt und 45 Minuten auf 186° gehalten. Ebenso wurden ein amorphes (I') und ein kristallinisches (II') von Zimmertemperatur langsam gegen 210° erhitzt und dann 60 Minuten auf dieser Temperatur erhalten. Man ersieht aus den entsprechenden Kurven in Fig. 19, daß die vorher kristallisierten Präparate nicht bloß von Anfang an höhere Leitfähigkeit besaßen, sondern daß auch während des Konstanthaltens der

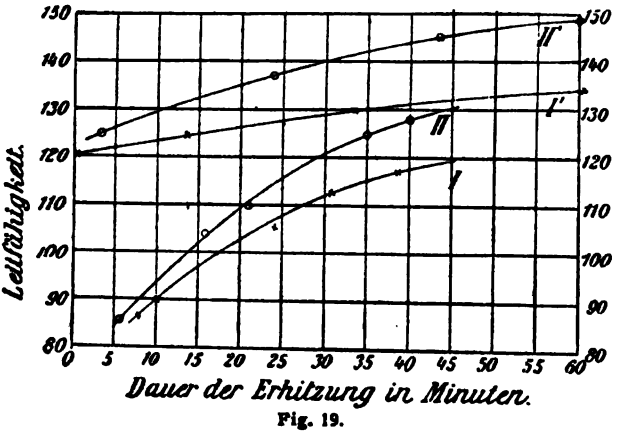


Fig. 19.

Temperatur die allmähliche Leitfähigkeitszunahme für die vorher kristallisierten Präparate größer war als bei den amorphen.

Kühlen wir ein Selenpräparat mit positivem Temperaturkoeffizienten des Widerstandes unter Null Grad fortgesetzt ab, so nimmt die Leitfähigkeit beständig zu, bis ein Wendepunkt in der Abkühlungskurve auftritt und dann mit abnehmender Temperatur die Leitfähigkeit wieder abfällt. Je tiefer dieser Wendepunkt, unterhalb dem der Temperaturkoeffizient des Widerstandes negativ ist, liegt, um so größer muß die Leitfähigkeit des Selens in der Nähe der Temperatur der flüssigen Luft ausfallen. Kühlen wir aber ein Präparat mit nur negativem Temperaturkoeffizienten des Widerstandes immer weiter ab, so wird sich dessen Leitfähigkeit beständig vermindern und bei sehr tiefen Temperaturen nur recht gering sein. So konnte Dowell (352) an mehreren Präparaten der letzten Art bei der Temperatur der flüssigen Luft nur mehr eine Spur von Leitfähigkeit feststellen.

Ich will nun im folgenden noch andere Verfahren zur Herstellung der graukristallinischen Selenmodifikation angeben, möchte aber schon an dieser Stelle betonen, daß keines dieser Verfahren metallisches Selen, sondern nur die Selenform Se_1 liefert. Zur Herstellung metallischen Selens haben wir also nur das eine Mittel, amorphe Präparate auf möglichst hoher Erhitzungstemperatur (200—215°) bis zur Erreichung der maximalen Leitfähigkeit zu erwärmen und rasch zu kühlen.

Die einfachste und schnellste Möglichkeit zur Gewinnung graukristallinischen Selens besteht darin, daß man den Körper, auf den das Selen aufgetragen werden soll, auf 150—200° erhitzt und unter leichtem Druck mit einem Stäbchen aus amorphem Selen bestreicht. Dabei schmilzt etwas Selen, um gleich darauf in der kristallinischen Modifikation zu erstarren. Wir haben also hier eine Methode, bei der das Selen beim Aufschmelzen sofort in die graukristallinische Form übergeht, ohne daß es einem besonderen Wärmeprozeß unterworfen wird. Dieses Verfahren, das zuerst von Weinhold (51) angegeben wurde, liefert eine mattgraue, bräunlich schimmernde Selenmasse von hohem Widerstande und negativem Temperaturkoeffizienten des Widerstandes, die sich für technische Zwecke wenig eignet.

Erhitzt man graukristallinisches Selen langsam so weit, bis Spuren des Schmelzens eintreten, so lassen sich die geschmolzenen Teile in wenigen Sekunden wieder zum Kristallisieren bringen, wenn man sogleich mit der Abkühlung beginnt. Ist jedoch die Selenmasse vollständig geschmolzen, so vergehen Stunden, bis man aus dem Schmelzfluß kristallinisches Selen gewinnen kann. Während die Herstellung der graukristallinischen Form durch Erhitzung

des festen amorphen Selens schon den älteren Forschern bekannt war, erfahren wir von der Kristallisation aus dem Schmelzfuß erst durch Siemens (26).

Kühlt man geschmolzenes Selen äußerst langsam auf Zimmertemperatur ab oder hält man es längere Zeit auf 200 bis 210° konstant, so geht es allmählich in die graue kristallinische Form über. Von wesentlichem Einflusse auf den Kristallisationsprozeß ist nach Marc (282) die Reinheit des Materials. Bei den reinen Präparaten erfolgt der Eintritt der Kristallisation meist wesentlich später als bei den unreinen, die Kristallation selbst vollzieht sich sodann aber mit viel größerer Geschwindigkeit. So war reines Selen bei 200° bereits 3—4 Stunden, käufliches Selen erst 10 Stunden nach Beginn der Kristallisation vollständig erstarrt. Als Marc reines Selen innerhalb 3 bis 4 Stunden von 210° auf 70° abkühlte, erhielt er keine Kristallisation; es genügte aber über die Masse zu hauchen, um die Kristallisation einzuleiten. Besonders empfiehlt es sich, die Kristallisation in einem trocknen Kohlensäurestrom vorzunehmen, wodurch der Prozeß wesentlich beschleunigt wird. Die Kristallisation geht allgemein von mehreren Punkten, den sogenannten Kristallisationszentren, aus und greift dann rasch um sich. Die Zahl der Kristallisationszentren wächst, je weiter man sich vom Schmelzpunkt entfernt. Wird die Kristallisation bei hoher Temperatur bewirkt, so wachsen die Zentren nach außen und bilden zusammenhängende Flächen, während bei tieferer Temperatur ein äußerst feinkörniges Aggregat entsteht. Auch das Licht ist von Einfluß auf die Kristallisationsgeschwindigkeit. Nach Saunders (147) vollzieht sich die Kristallisation unter der Einwirkung des Lichtes viel rascher als im Dunkeln.

Die von Marc gemachte Beobachtung, daß die Kristallisation rasch um sich greift, wenn sie einmal eingesetzt hat, wird durch einen von mir (315) unternommenen Versuch, bei dem ich die elektrische Leitfähigkeit während der Kristallisation gemessen habe, sehr gut bestätigt. Ein Präparat wurde über den Schmelzpunkt erwärmt, dann auf 200° abgekühlt und die Temperatur 3½ Stunden konstant gehalten. Die elektrische Leitfähigkeit war die ersten 40 Minuten äußerst gering (Fig. 20); plötzlich stieg die Stromstärke ganz bedeutend an, um später immer langsamer zu wachsen. Nach 3½ Stunden war das Maximum der Leitfähigkeit noch lange nicht erreicht. An dem steilen Anstieg der Kurve ersieht man, daß sich die eigentliche Kristallisation sehr rasch vollzieht.

Ein aus dem Schmelzfluß kristallisiertes Selenpräparat besitzt ein hellgraues, silberglänzendes Aussehen, ungefähr dieselbe elektrische Leitfähigkeit wie metallisches Selen, aber einen negativen Temperaturkoeffizienten des Widerstandes (Selenform Se_1).

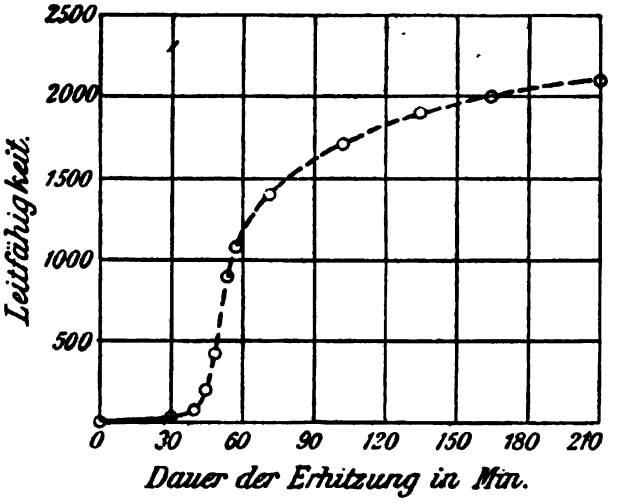


Fig. 20.

Läßt man geschmolzenes Selen rasch erkalten, so entsteht schwarzes amorphes Selen; streicht man aber über die sich abkühlende Selenmasse widerholt unter mäßigem Druck mit einem glatten Gegenstand, so geht sie in weniger als einer Minute in die graue Modifikation über. Dieses von mir (171) gefundene Kristallisationsverfahren liefert eine mattgrau, bräunlich schimmernde Selenmasse von hohem Widerstande und negativem Temperaturkoeffizienten des Widerstandes (Selenform Se_1), wie man sie durch das Verfahren von Weinhold (S. 38) erhält.

Von den auf chemischem Wege (S. 14) herstellbaren grauen Selenarten besitzt nur das durch längeres Stehenlassen in Chinolin kristallinisch gemachte Selen bereits bei Zimmertemperatur ohne Erhitzungsprozeß elektrische Leitfähigkeit. Da der spezifische Widerstand derartiger Präparate noch wesentlich höher ist als bei den durch Erhitzung gewonnenen, so kommen sie für technische Zwecke nicht in Betracht. Der Temperaturkoeffizient des Widerstandes ist negativ. Das längere Stehen in Chinolin wirkt also auf das Selen wie ein Erhitzungsprozeß bei niedrigerer Temperatur (Schrott 258). Die auf diesem Wege hergestellten Präparate besitzen im allgemeinen die Eigenschaften des feuchten Selens, lassen sich aber durch Erhitzen über 200° in metallisches Selen umwandeln.

III. Die Herstellung der Selenzellen.

Das graukristallinische Selen verdankt seine Bedeutung der Lichtempfindlichkeit, jener wunderbaren Eigenschaft, daß sein Widerstand unter dem Einflusse des Lichtes beträchtlich sinkt. Für technische Zwecke wären natürlich diejenigen Selenpräparate am wertvollsten, die sehr geringen Widerstand und zugleich recht große Lichtempfindlichkeit, d. h. recht hohe Widerstandsänderung bei Belichtung aufweisen. Leider sind im allgemeinen gerade diejenigen Präparate am empfindlichsten, die hohen Widerstand zeigen, so daß die Herstellung wirklich brauchbarer Selenpräparate vielen Schwierigkeiten begegnet.

Um eine möglichst starke Verringerung des Selenwiderstandes zu erzielen, macht man den Leitungsquerschnitt möglichst groß und den Leitungsweg möglichst klein; es müssen also die Elektroden möglichst große Oberfläche und möglichst geringen Abstand aufweisen. Ein Haupterfordernis ist, daß die Elektroden an allen Stellen gleiche Entfernung von einander besitzen, damit sich der Strom über die ganze Selenschicht gleichmäßig verteilt. Ferner muß die Selenschicht möglichst dünn gemacht werden, damit die dem Lichte ausgesetzte Selenoberfläche einen wesentlichen Bestandteil der ganzen Selenmasse ausmacht. Auch sind die Elektroden so anzuordnen, daß die Lichtstrahlen auf die Stellen größter Stromdichte auftreffen, weil dann bei Bestrahlung eine im Verhältnis zum Gesamtwiderstand möglichst hohe Widerstandsänderung eintritt.

Die in der Elektrotechnik verwendeten Präparate führen den Namen Selenzellen oder Selenbrücken, da das Selen gleichsam eine Brücke zwischen den beiden Elektroden bildet. Zum Bau einer Selenzelle benutzt man nur reines, möglichst trockenes Selen; es empfiehlt sich aber, Silber in einer Menge von 0,01 bis 0,1% dem Selen beizumengen, damit das Präparat möglichst rasch den der jeweiligen Temperatur entsprechenden Widerstand annimmt (S. 33). Nach Chiarini (327) wäre rotes amorphes Selen dem schwarzen vorzuziehen; es soll empfindlicher sein und auf Lichtänderungen schneller ansprechen als schwarzes. Was diesen Punkt betrifft, so muß ich darauf hinweisen, daß die Empfindlichkeit und Reaktionsgeschwindigkeit des Selens in erster Linie von der Art des Erhitzungs- bezw. Kristallisationsprozesses abhängt, so daß der Einfluß des Selenmateriales auf beide Eigenschaften nur bei vollkommen gleicher Herstellung der Zellen einwandfrei festgestellt werden kann. Es lassen sich z. B. durch entsprechende Kristallisation leicht Zellen bauen, die auf sehr schwache Lichteindrücke noch auffallend gut, aber dafür nur sehr langsam ansprechen. Diese speichern gleichsam auffallende Energie in sich auf.

Man kann unter den verschiedenen Selenzellentypen zwei Gruppen unterscheiden. Bei der ersten Gruppe fallen die Lichtstrahlen senkrecht zur Stromrichtung auf, bei der zweiten gehen sie parallel mit ihr. Im allgemeinen neigt man der Anschauung zu, daß die erste Anordnung am vorteilhaftesten sei. Sperling (292) kam durch theoretische Betrachtungen zu dem Schlusse, daß die Zellen der 1. Gruppe denen der 2. prinzipiell überlegen sind; diese Überlegenheit verschwindet bei unendlich dünner Schicht, sie wird immer größer mit Zunahme der Schichtdicke.

Zu anderen Resultaten kamen in den letzten Jahren Tyndall und White (450 und 451), sowie Gripenberg (438). Tyndall und White ließen in einer kupfernen Form Selenwürfel kristallisieren. Durch Anpressen von Elektroden aus feinem Kupferdrahtnetz oder aus Glasplatten mit einem halbdurchsichtigen Platinniederschlag konnte jeder Würfel sowohl in der Richtung des Stromdurchganges als auch senkrecht dazu untersucht werden. Bei Verwendung desselben Selenpräparates und Belichtung derselben Fläche ließen sich die Wirkungen in beiden Fällen vergleichen. Bei einem Selenwürfel von 1 cm Kantenlänge zwischen Elektroden aus Kupferdrahtnetz betrug die Widerstandsänderung in der zur Belichtung senkrechten Richtung 3,6%, in der Richtung der Belichtung aber 18,2%. Es ist nach Tyndall und White nicht nötig, daß zur Herstellung einer merklich empfindlichen Zelle zweiter Art die Dicke der Selenschicht in der Richtung des Lichtes außerordentlich klein sei; denn die Widerstandsänderung bei Belichtung war selbst dann merklich, wenn die Schichtdicke mehrere Millimeter betrug. Die beiden Forscher sind der Anschauung, daß die Wirkung des Lichtes auf das Selen hauptsächlich in einer Herabsetzung des Übergangswiderstandes von Selen und Elektrode besteht; denn der scheinbare Widerstand erwies sich in sehr hohem Maße von der Natur der Elektroden abhängig. Ein Selenwürfel hatte zwischen Stanniolelektroden im Dunkeln einen Widerstand von 46 000 Ohm, bei Elektroden aus Kupferfolie 88 000 Ohm, bei Elektroden aus Kupferdrahtnetz 157 000 Ohm.

Die Ergebnisse von White veranlaßten Gripenberg (438), die Versuche in etwas abgeänderter Weise an dünnen Selenschichten von 0,05 mm Dicke zu wiederholen. Gegen die Selenplatte S (Fig. 21) seien 2 Elektroden E_1 und E_2 gepreßt. Verbindet man letztere mit den Polen einer Stromquelle, so ist die Lichtrichtung senkrecht zur Stromrichtung (1. Zellentype). Legt man aber auf die Selenplatte noch eine dritte Elektrode, etwa eine vergoldete Glasplatte E_3 und verbindet E_1 und E_2 mit dem einen Pol, E_3 dagegen mit dem anderen Pol der Stromquelle, so ist die Strom- und Lichtrichtung dieselbe (2. Zellentype). Bei der ersten Anordnung fällt das Licht auf

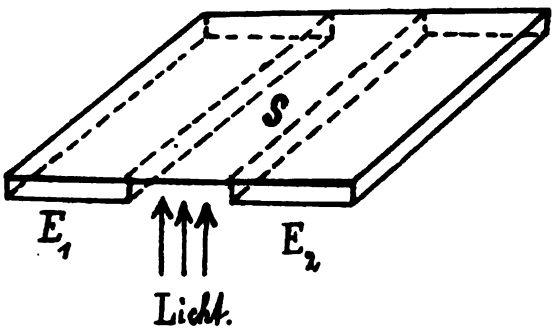


Fig. 21.

die Stelle größter Stromdichte, umgekehrt bei der zweiten. Bei den Messungen hatten die Elektroden die Form eines Gitters, wie es Fig. 33 veranschaulicht. Es ergab sich das für Theorie und Technik wichtige Resultat, daß die durch Belichtung verursachte Zunahme der Stromstärke bei der zweiten Zellentype wesentlich größer war als bei der ersten Schaltung, daß also der Lichteffekt größer ist, wenn Strahlen- und Stromrichtung parallel gehen. Da ferner die Lichtwirkung bei der 1. Schaltung die gleiche blieb, wenn das Licht auf die Vorder- oder Rückseite der 0,05 mm dicken Selenplatte fiel, so muß es sich um Widerstandsänderungen sehr tief liegender Schichten und nicht um bloße Änderung eines Übergangswiderstandes zwischen Selen und Elektrode handeln.

Tyndall, White und Gripenberg stimmen darin überein, daß die Wirkung des Lichtes auf das Selen am stärksten ist, wenn Strahlen- und Stromrichtung parallel gehen; sie kamen damit zu einem Ergebnis, das der allgemeinen Anschauung widerspricht. Es wäre indes ein großer Fehler, die genannten Resultate ohne weiteres zu übergehen, da diese Frage für den Bau von Selenzellen von ganz hervorragender Bedeutung ist. Es scheint mir vielmehr die Klärung der Frage eine der dringendsten Aufgaben der Selentechnik zu sein.

Die andere Anschauung, daß die Wirkung des Lichtes hauptsächlich in einer Änderung des Übergangswiderstandes von Selen und Elektrode bestehe, verwirft Gripenberg und zwar mit Recht, wie auch aus den Mitteilungen zahlreicher anderer Forscher hervorgeht. Es läßt sich bei Bestrahlung eines geeigneten Präparates selbst bei vollständiger Verdeckung der Elektroden eine deutliche Widerstandsabnahme feststellen. Der von Gripenberg ausgeführte Versuch wurde in ähnlicher Weise bereits 2 Jahre früher von Glatzel (394) unternommen. Seine Selenzellenanordnung ist aus Fig. 22 zu ersehen. Als Träger für die Selenschicht, die absichtlich

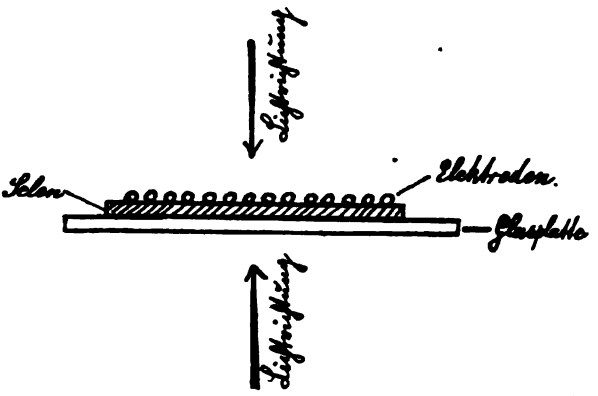


Fig. 22.

ziemlich stark gemacht wurde, benutzte er eine durchsichtige Glasplatte. Die Elektroden hatten die Form eines Gitters, wie es ungefähr in Fig. 33 dargestellt ist. Ließ man den Strom zwischen den Elektroden durch die Selenschicht übergehen, so trat nicht bloß bei Bestrahlung von oben, sondern auch bei Belichtung von der Rückseite eine deutliche Widerstandsabnahme ein. Da nicht angenommen werden kann, daß durch die verhältnismäßig dicke Selenschicht noch eine größere Lichtenergie bis zu den Elektroden durchdringen konnte, muß die Widerstandsänderung in den unteren Schichten des Selens erfolgt sein.

Daß das Elektrodenmaterial auf den Widerstand eines Selenpräparates von Einfluß ist, darf mit Sicherheit angenommen werden. Während nun die einen Forscher Metallelektroden, welche Selenide zu bilden imstande sind, absichtlich vermieden, haben andere gerade solche Elektroden bevorzugt, da die Selenide die Lichtempfindlichkeit nach ihrer Anschauung erhöhen. Fabriken, welche Selenzellen herstellen, verwenden gewöhnlich Elektroden aus Kupfer, z. T. auch aus Platin. Selenzellen mit Platinelektroden sollen geringere Trägheit (S. 72) besitzen. Von besonderer Wichtigkeit ist, daß das Selen fest an den Elektroden haften bleibt. Da die kristallinische Form in der Regel durch einen Erhitzungsprozeß gewonnen wird, ist es nicht ausgeschlossen, daß die Selenschicht bei der Abkühlung infolge der bedeutenden Kontraktion rissig wird und sich teilweise vom Elektrodenmaterial löst. Daher wendet man gewöhnlich langsamere Kühlung an, obwohl gerade rasche Abkühlung die Ausbildung metallischen Selens begünstigt.

1. Gruppe.

Bei den Zellen der ersten Gruppe ist die Lichtrichtung senkrecht zur Richtung des Stromes. Sie werden im allge-

meinen in zwei Typen hergestellt und zwar als **Drahtzelle** und als **gravierte Zelle**.

a) Die Drahtzelle.

Ein viereckiges Täfelchen aus Isoliermaterial wird auf einer Seite mit einer dünnen schwarzen Selenschicht überzogen. Dies erreicht man z. B. dadurch, daß man das Täfelchen über den Schmelzpunkt des Selens (217° C) erhitzt und mit Selen bestreicht. Dann werden zwei feine blanke Drähte in sehr geringem Abstande parallel zu einander mittels einer Wickelmaschine aufgewunden, wie es aus Fig. 23 ersichtlich

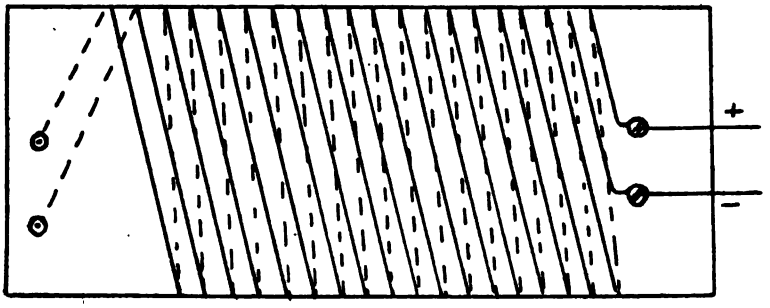


Fig. 23.

ist. Am besten erwärmt man das Täfelchen und die Drähte während dieses Prozesses etwas, weil sich dann die Drähte in die Selenschicht, die sie teilweise schmelzen, einbetten und bei der nachherigen Präparation nicht so leicht verschieben können. Das Selenpräparat hat nunmehr ein schwarzes, glasiges Aussehen. Um dasselbe zu sensibilisieren, d. h. in die lichtempfindliche, graukristallinische Modifikation überzuführen, erwärmt man es langsam auf 190—210° C in einem Luft- oder Ölbad, erhält es eine oder mehrere Stunden auf dieser Temperatur und kühlt es dann allmählich ab. Während der Abkühlung oder wenigstens sofort nach derselben überzieht man das Präparat mit einer durchsichtigen Firnisschicht oder schließt es in eine evakuierte Röhre ein.

Die Sensibilisation bezw. Kristallisation des Selens kann man auch in der Weise vornehmen, daß man das Selen durch Erwärmen über 217° zum Schmelzen bringt, dann auf 200 bis 210° abkühlt und die Temperatur mehrere Stunden konstant hält.

Als Isolationsmaterial bezw. als Selenträger verwendet man vor allem Talk, Porzellan und Glimmer. Schiefer eignet

sich weniger wegen seiner Brüchigkeit und metallischen Adern, auf Glas haftet das Selen nicht gut.

Statt auf das Isolationsmaterial zuerst die amorphe Selenschicht und dann die Drahtwindungen aufzubringen, kann man natürlich auch umgekehrt verfahren. Dabei begegnet man aber der Schwierigkeit, daß beim Auftragen des Selens, das doch nur bei Erhitzung vorgenommen werden kann, die Drähte sich ausdehnen und verschieben, so daß Kontakte oder wenigstens ungleichmäßige Abstände zwischen den Drähten sich bilden. Um diesem Übelstande abzuhelfen, hat Ruhmer (160) den Selenträger durch 2 Täfelchen ersetzt, die man gegenseitig verschieben konnte. Durch diese Anordnung sollte die Spannung der Drähte und eine möglichst enge Bewicklung ermöglicht werden. Meines Wissens wird diese Einrichtung in der Selentechnik zur Zeit jedoch nirgends verwendet.

Die Herstellung der Selenzelle wird im allgemeinen geheim gehalten; sie ist Fabrikationsgeheimnis. Nach dem ersten von mir angegebenen Verfahren gelingt es indes nach einiger Übung leicht, eine ziemlich gute Selenzelle herzustellen. Macht die gleichmäßige Wickelung des Drahtes Schwierigkeiten, so kann man sich des folgenden von Pfund (326) angegebenen Verfahrens bedienen. Man breitet eine dünne Selenschicht auf dem Isolator aus und wickelt 4 Stränge eines feinen Drahtes so um das Präparat, daß sie die ganze Selenfläche bedecken. Wickelt man dann den 2. und 4. Draht ab, so ist der erste von dem dritten durch einen gleichmäßigen Zwischenraum getrennt. Hierauf erfolgt die Sensibilisation in der angegebenen Weise.

Hat die Selenzelle eine recht glänzende Oberfläche, so kann diese durch den Sandstrahl mattiert werden, damit mehr Lichtenergie absorbiert und weniger reflektiert wird. Von besonderer Wichtigkeit ist es, wie schon erwähnt, das fertige Präparat umgehend mit einem durchsichtigen Firnisüberzug zu versehen oder in eine evakuierte Röhre einzuschließen. Es hat sich nämlich gezeigt, daß gewisse Selenarten stark hygroskopisch sind und daß bei Feuchtigkeitsaufnahme die Zelle großen Schaden leidet (Ries 315, 383). Marc (282) schlägt vor, die Kristallisation im Vakuum oder in einer möglichst trockenen und sauerstoffreien Atmosphäre vorzunehmen, um die schädliche Bildung von Selendioxyd zu vermeiden. Vor dem Gebrauch muß man das Präparat mehrere Tage bei Zimmertemperatur ausruhen lassen, bis es einen annähernd konstanten Widerstand angenommen hat. Daß die Einstellung in die Gleichgewichtslage durch Zusatz von 0,01—0,1 % Silber zu reinem Selen beschleunigt wird, wurde bereits erwähnt.

Fig. 24 bringt das Bild eines fertigen Selenpräparates in der graukristallinischen Modifikation. Man erkennt sofort wie

aus Fig. 1, daß es sich hier nicht um eine einheitliche Masse, sondern um ein Konglomerat mehrerer Selenformen handelt.

Die meisten Firmen, die sich mit der Fabrikation von Selenzellen befassen, stellen diese in der eben beschriebenen Form her. Wir wollen sie künftighin kurz die Bid-

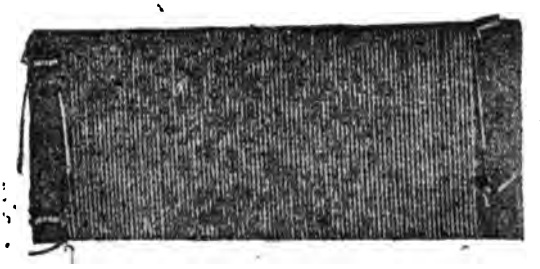


Fig. 24.

wellsche Form heißen, da sie zuerst von Bidwell (54—56) beschrieben worden ist.

Wir wollen nun noch einige andere Formen von Drahtzellen kurz betrachten.

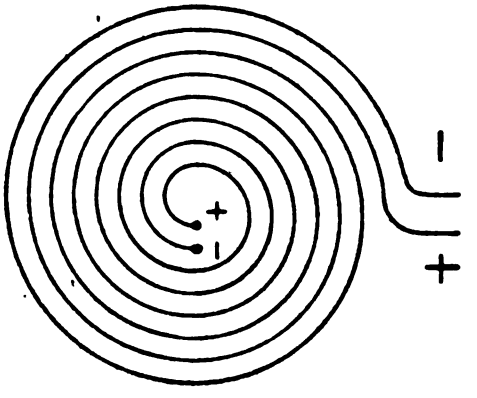


Fig. 25.

Fig. 25 zeigt eine Anordnung von Siemens (21), bei der die Drähte in Spiralen auf einer Glimmerplatte befestigt sind. Auf dem Präparat wurde zum Schutze gegen äußere Einflüsse ein 2. Glimmerblatt befestigt.

In einigen Fällen verwendete Siemens (21) statt der spiralenförmigen Elektroden Drähte in Zickzackform.

Mercadier (61) benutzte die in Fig. 26 dargestellte Anordnung. Zwei Messingbänder von 0,1 mm Dicke, 1 cm Breite und 5 m Länge wurden durch Pergamentstreifen von ca. 0,15 mm Dicke von einander isoliert, dann spiralförmig aufgerollt und die Endfläche mit einer dünnen Selenschicht überzogen. Zum Schutze gegen äußere Einflüsse versah Mercadier wie Siemens die Oberfläche mit einem Glimmerblatt oder auch mit einem Lackanstrich.

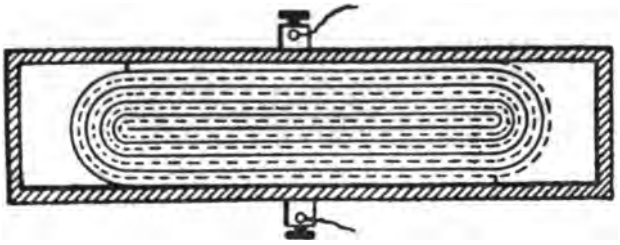


Fig. 26.

Bell (36) versah eine Metallplatte mit zahlreichen Löchern, eine zweite mit entsprechenden konischen Metallstiften, die beim Zusammenlegen der beiden Platten genau in die Löcher der ersten hineinragten. Die ringförmigen Zwischenräume wurden mit Selen ausgefüllt, während die Platten selbst durch ein dünnes Glimmerblatt von einander isoliert wurden.

Bell benutzte außerdem noch eine zylindrische Anordnung, Er reihte eine Anzahl kreisförmiger Messing- und Glimmerscheiben von etwas geringerem Durchmesser abwechselnd aufeinander auf und füllte die zwischen den einzelnen Platten entstandenen Rillen mit Selen aus. Dann wurden die geradzahligen Elektroden mit einander verbunden und ebenso die ungeradzahligen.

Weinbold (51) verbesserte die zylindrische Zelle dadurch, daß er in eine Glasröhre eine doppelgängige Schraubenlinie einätzte und in die Schraubengänge, deren Abstand 0,4 mm betrug, feine Platindrähte einlegte. Hierauf wurde der Zylinder erwärmt, mit Selen bestrichen und bei 180 ^{0} C sensibilisiert.

Von Bronk und Ruhmer (159, 160) wurde die zylindrische Zelle noch weiter vervollkommnet, indem sie als Selenträger einen Specksteinzylinder, in den eine doppelgängige Schraubenlinie eingeschnitten war, verwendeten und in eine evakuierte Glasbirne einschlossen (Fig. 27). Die Zelle wurde sodann in der optischen Achse eines Parabolreflektors angebracht, damit sie von allen Seiten gleichmäßig beleuchtet wird. Bei

Fig. 27.

der in Fig. 28 angegebenen Anordnung sind Glasbirne und Reflektor vereinigt, indem die Glasbirne kegelförmig gestaltet und der Kegelmantel innen versilbert wurde, so daß die auf die Metallfläche auftreffenden Strahlen nach dem Selenzylinder reflektiert werden.

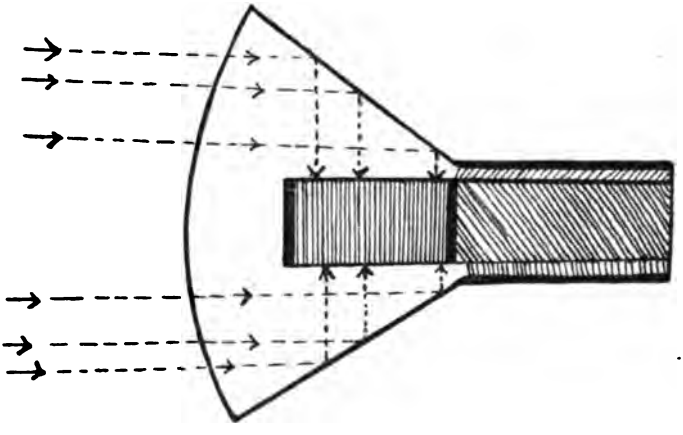


Fig. 28.

Schließlich sei hier noch eine von Marc (282) zur Untersuchung der elektrischen Eigenschaften des Selens angewendete Versuchsordnung wiedergegeben, bei der das Licht auf die Stellen größter Stromdichte auffällt. Auf einer Glasplatte wurden scharf abgeschliffene vergoldete Neusilberstangen als Elektroden im Abstande von 0,2 mm befestigt und die zwischen ihnen entstandene keilförmige Vertiefung mit Selen ausgefüllt. Fig. 29 stellt die Marcsche Konstruktion von oben gesehen und im Querschnitt dar. In der rechten Figur bedeuten a die Elektroden, Se die Selenmasse, b eine Glasplatte. Die Beleuchtung erfolgt in der Richtung des Pfeiles durch die Glasplatte hindurch. Obwohl bei dieser Anordnung der kleinste Querschnitt der Selenmasse, der für die Elektrizitätsleitung hauptsächlich in Betracht kommt, vom Lichte beeinflußt wird und nach den Angaben von Marc die Wider-

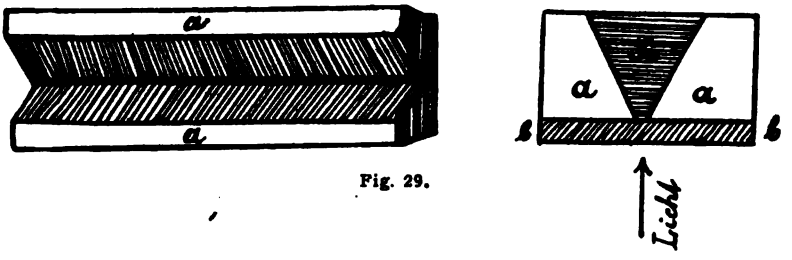


Fig. 29.

standsänderung bei einem solchen Selenspalt sich wesentlich schneller vollzieht als bei einer Zelle Bidwellscher Art, kommt sie doch für technische Zwecke infolge ihres hohen Widerstandes nicht in Frage.

b) Die gravierte Zelle.

Auf ein verhältnismäßig weiches Isoliermaterial z. B. auf ungebrannten Naturspeckstein wird eine feine Platinschicht aufgetragen und diese durch Gravierung mit einem spitzigen Instrument in zwei Teile getrennt, wie es aus Fig. 30 ersichtlich ist. Die Verbindung der beiden Platinschichten wird durch eine dünne Selenschicht wieder hergestellt. Diese wird zuerst in amorphem Zustande auf die gravierte Platte aufgetragen und dann durch Erhitzung auf 190—210 ^{0} in die kristallinische Modifikation übergeführt. Um die Zellen gegen die anerkannt schädlichen Einflüsse der Atmosphäre zu schützen, werden sie in einer neutralen isolierenden Flüssigkeit getränkt. Vor der Benützung müssen sie mehrere Tage im Dunkeln aufbewahrt werden, bis sie einen annähernd konstanten Widerstand angenommen haben.

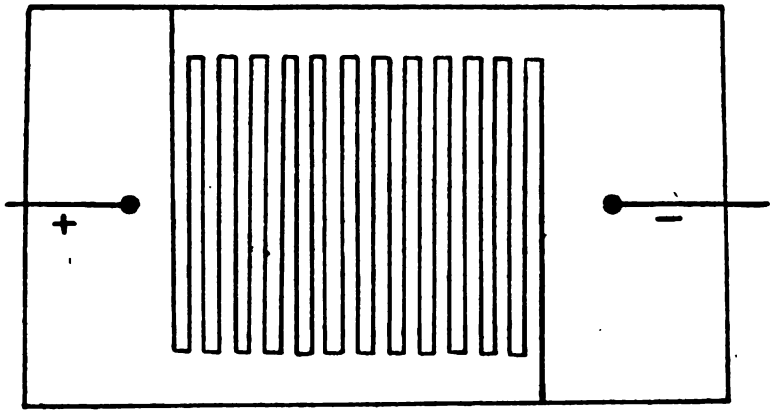


Fig. 30.

Die gravierten Selenzellen haben vor den Drahtzellen drei wesentliche Vorzüge:

1. Die Zwischenräume zwischen den Elektroden können sehr klein und recht gleichmäßig gemacht werden. 2. Die Selenschichten lassen sich in fast beliebiger Feinheit herstellen, so daß die vom Lichte beeinflußte Schicht einen wesentlichen Bestandteil der ganzen Selenmasse ausmacht. 3. Die Beleuchtung kann von beiden Seiten in bequemer Weise erfolgen.

Ein äußerst wichtiger Bestandteil der gravierten Selenzelle ist der Selenträger. Es mußte ein Isoliermaterial gefunden werden, auf dem die Platinschicht sehr fest haftet und beim Durchgleiten der Reißnadel zur Herstellung des Trennungsstriches keine Metallteilchen von den benachbarten Flächen mit abgerissen werden. Glas, Porzellan und andere harte Materialien erwiesen sich als unbrauchbar; als besonders geeignet von den weichen Isoliermaterialien hat Presser (288, 339) den ungebrannten Naturspeckstein gefunden. Auf diesem läßt sich die Gravierung so exakt durchführen, daß die Entfernung beider Elektroden wenige Hundertstel Millimeter klein gemacht werden kann. Ungebrannter Naturspeckstein hat den weiteren Vorzug, daß das Selen auf ihm weit besser als auf den meisten anderen Materialien haftet.

Große Schwierigkeit bot die Herstellung und Kristallisation möglichst dünner Selenschichten. Es wurde früher (S. 13) bereits erwähnt, daß sich geschmolzenes Selen zu Metallen, Glas und anderen Materialien verhält wie Wasser zu einer fettigen Oberfläche, indem es in Tröpfchen zusammenfließt. Es gelingt daher nur sehr schwer, auf dem Selenträger eine recht dünne Selenschicht aus amorphem Selen niederzuschlagen. Hat man aber tatsächlich einen feinen Niederschlag amorphen Selens erhalten und man bringt das Präparat zur

Kristallisation in den Heizapparat, so erweicht das Selen bei ca. 70° und fließt in Tröpfchen zusammen oder verschwindet vollständig infolge Verdunstung. Über die Herstellung feiner kristallinischer Selenschichten geben uns die Arbeiten von Reinganum (254, 289), Pfund (336), Gripenberg (331, 395, 396) und Salviati (344) wertvollen Aufschluß.

Reinganum setzte ein mit Wasser befeuchtetes Platinblech kurze Zeit den Dämpfen von geschmolzenem Selen aus. Es schlägt sich dann auf dem Blech eine dünne zusammenhängende Selenschicht nieder. Diese wurde mit einer Stahlfläche schwach poliert und durch Erhitzen in einem Luftbad auf 180° in die kristallinische Modifikation übergeführt.

Ein Mittel zur Herstellung dünner Selenschichten bietet die Kathodenzerstäubung. Interessant sind die Resultate, zu denen Pfund bei seinen Versuchen gelangte. Er brachte in der Vakuumröhre 2,5 cm unter der einen Elektrode, die aus einem mit kristallinischem Selen versehenen Aluminiumblech bestand, eine Glasplatte an. Dabei wurde nicht, wie üblich, der Strom von der Sekundärspule eines Induktoriums, sondern hochgespannter Wechselstrom von 1000 Volt verwendet, da Aluminium nicht zerstäubt wird. In 2 Minuten entstand ein starker Selenniederschlag, der körnig und daher ungeeignet war. Pfund erhielt aber harte, zusammenhängende Schichten, wenn er in den Primärkreis Widerstand einschaltete und dadurch den Sekundärstrom so weit herabdrückte, bis die Niederschlagszeit auf ungefähr 4 Stunden gestiegen war. Auf der Glasplatte schlug sich amorphes Selen nieder, obgleich die Kathode mit kristallinischem Selen überzogen war. Diese auffallende Erscheinung, daß die bei der Kathodenentladung entstehenden Schichten amorph sind, hatte bereits früher Longden (146) beobachtet.

Die Kohärenz sehr dünner Schichten gelang Gripenberg (396) dadurch, daß er die amorphe Selenschicht mit einem dünnen Firnis, am besten mit Zaponlack überzog und nach sorgfältiger Trocknung desselben die Sensibilisation bei drei Stunden langer Erhitzung auf 180—200° C vornahm. Dieses Verfahren ist stets verwendbar bei Schichten von 1000 bis ca. 50 μμ (0,001—0,00005 mm).

Gripenberg fand, daß Selen bis zur Schichtdicke von etwa 100 μμ herunter normal kristallisiert, während Pfund noch kristallinisches bei 50 μμ Dicke erhielt. Nach Gripenberg beginnt kristallinisches Selen bei 550 μμ Dicke durchscheinend zu werden und zwar mit dunkelroter Farbe. Es ist allem Anscheine nach aber nicht die gleiche Farbe, die amorphes Selen aufweist, sondern mehr unrein, einen Stich ins Violett besitzend. Keilförmige Platten von 1000 μμ am dicken bis ca. 50 μμ am dünnen Ende zeigen kontinuierlichen Übergang der Farbe von Schwarz, Dunkelrot, helleres Rot bis hell Purpur.

Die Anwendung der chemischen Kristallisationsmethode empfiehlt sich für dünne Selenschichten nach Gripenberg nicht. Als er eine 1000 μμ dicke amorphe Selenschicht in Chinolin brachte, setzte die Kristallisation an zahlreichen Punkten zugleich ein, schritt aber nur sehr langsam vorwärts. Nach 24 Stunden erwies sich die Selenschicht vollständig kristallisiert, sie bildete aber keine zusammenhängende Fläche mehr, sondern war aufgelöst in lauter isolierte Teilchen von ca. 0,05 mm Durchmesser.

Salviati (332) empfiehlt kristallinisches Selen in zerstäubtem Zustande gegen den gravierten Selenträger zu pressen. Dieses Verfahren habe den Vorteil, daß das Selen vor metallischen Beimengungen geschützt wird, während infolge des Erhitzungsprozesses eine chemische Verbindung des Selens mit dem Metall eintrete. Die erhaltenen Selenzellen hatten indes den Nachteil, daß sie einen unbequem hohen Widerstand besaßen.

Nachdem wir die Herstellung sehr dünner Selenschichten kennen gelernt haben, wollen wir nunmehr die einzelnen Formen von gravierten Zellen behandeln.

Liesegang (105, 110) versilberte eine Glasplatte auf einer Seite und teilte die Metallschicht durch einen feinen Strich mit einer Nadelspitze in zwei gleiche Teile. Die Verbindung der beiden Silberschichten wurde dann durch eine Selenschicht wieder hergestellt. Dadurch, daß die Zelle von der Rückseite belichtet werden kann, ist es möglich, das Licht auf die Stelle größter Stromdichte zu werfen.

Eine wesentliche Verbesserung dieser Zellenform habe ich (342) dadurch erreicht, daß ich auf einer mit einem feinen Platinniederschlag versehenen Glasplatte eine Gravierung, wie sie in Fig. 30 dargestellt wurde, anbrachte und zur Herstellung möglichst feiner Selenschichten nach dem Verfahren von Reinganum (S. 52) Selendampf auf der gravierten Platte niederschlug. Die Anwendung einer umfangreichen Gravierung an Stelle eines einfachen Trennungsstriches vergrößert den Leitungsquerschnitt und setzt dadurch den Zellenwiderstand herunter. Die Auftragung sehr feiner Selenschichten hat den Vorteil, daß so ziemlich die ganze Selenschicht vom Licht durchsetzt und somit eine im Verhältnis zum Gesamtwiderstand möglichst große Widerstandsänderung erzielt wird, sie hat aber den Nachteil, daß ihr Widerstand mit Abnahme der Schichtdicke steigt.

Die gravierte Selenzelle hat Presser (339) weiter vervollkommnet, indem er als Selenträger ein verhältnismäßig weiches Isoliermaterial und zwar ungebrannten Naturspeckstein verwendete, auf dem eine Platinschicht niedergeschlagen wurde. Diese Zelle hat zwar den großen Nachteil, daß sie

nicht von der Rückseite beleuchtet werden kann, besitzt aber den Vorzug, daß die Eigenart des Materiales die Herstellung kleinster Elektrodenabstände und die Aufbringung ganz feiner Selenschichten gestattet.

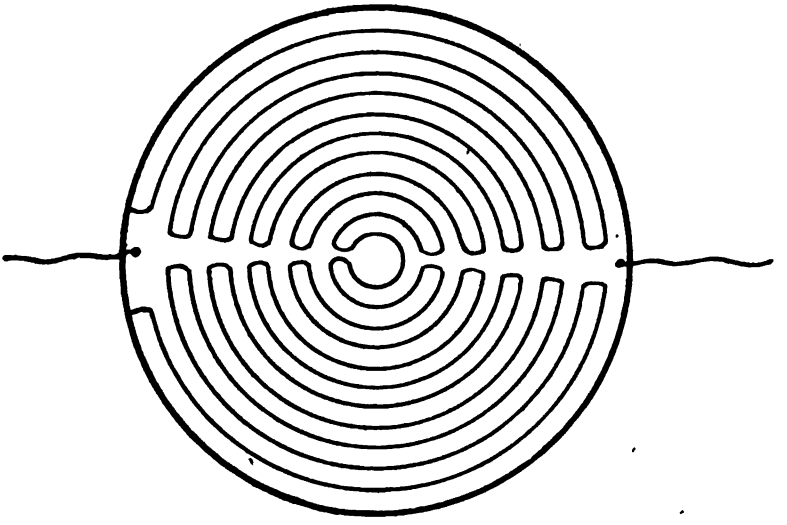


Fig. 31.

Presser stellte die Zellen zuerst mit bogenförmigen Elektroden (Fig. 31) her, ging aber dann zur Fabrikation gravierter Zellen mit geraden Elektroden (Fig. 32) über. Abgesehen da-

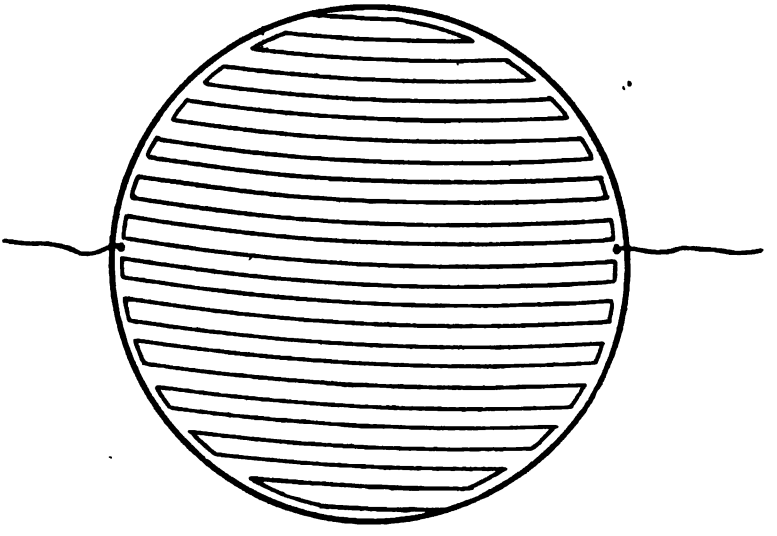


Fig. 32.

von daß die Herstellung einfacher ist, hat diese Form den Vorzug, daß die Ausnützung der Zellenoberfläche günstiger und der Längenunterschied bei den Elektroden kleiner wird. Presser erwärmt die Präparate nach Auftragung der amorphen Selenschicht in einer Flüssigkeit, in der die bekannte rote Selenmodifikation in aufgelöstem Zustande enthalten ist, wodurch die Lichtempfindlichkeit zunehmen soll.

Gripenberg (306, 331, 355, 395, 396, 438) hat sich eingehend mit der Verbesserung der gravierten Zelle beschäftigt. Als Selenträger benutzte er gewöhnlich Glas, in das zwei Furchen oder Rillen eingeätzt und innen mit Platin bekleidet wurden. Späterhin (396, 438) verwendete er die in Fig. 33 dargestellte

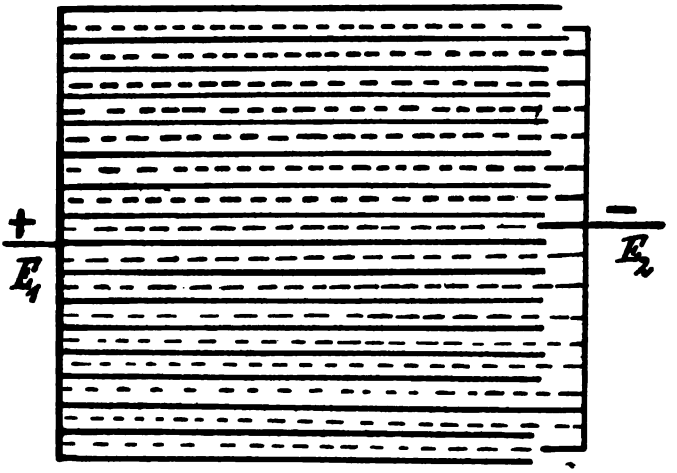


Fig. 33.

Gitterform. Jede der beiden Elektroden E_1 und E_2 besteht aus einem Gitter mit 30 Stäben, die 0,07 mm breit, 5 mm lang und 0,0002 mm dick waren. Der freie Zwischenraum zwischen zwei Stäben (die Selenbrücke) war 0,07 mm.

Um eine möglichst starke Ausnützung des Lichtes zu ermöglichen, hat Gripenberg (355) die in Fig. 34 dargestellte Anordnung getroffen. Eine Glasplatte ist beiderseits mit einem feinen Platingitter versehen und mit einer dünnen Selenschicht überzogen. Die Belichtung erfolgt in der durch den Pfeil angedeuteten Richtung durch die schmalen Seitenkanten der Glasplatte, also nicht senkrecht, sondern parallel zur Selenfläche. Der Lichtstrahl wird bei seinem Durchgang von einer Selenfläche nach der gegenüberliegenden reflektiert und wieder zurückgeworfen; ist er an der anderen Seitenkante angelangt, so trifft er auf einen spiegelnden Überzug und nimmt

infolgedessen seinen Weg noch einmal nach rückwärts durch die Platte. Dadurch wird die Energie des Lichtstrahles fast vollständig aufgezehrt. Da die vom Licht getroffene Fläche sehr klein ist, hat Gripenberg mehrere Zellen dieser Art nebeneinander angeordnet, um bei kleiner Raumbeanspruchung eine möglichst große wirksame Oberfläche zu erzielen. Giltay (353) erwartet von dieser Anordnung keinen Erfolg, da die Lichtstrahlen unter einem spitzen Winkel auf die Selenmasse

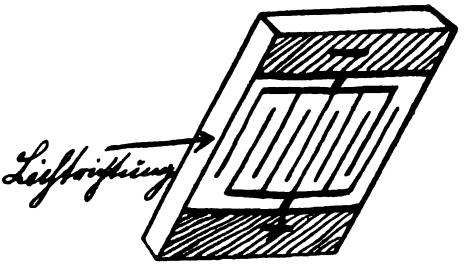


Fig. 34.

auftreffen, und von der Selenoberfläche infolge ihres besonderen Glanzes fast vollständig reflektiert werden, wodurch sie für den Lichteffekt größtenteils verloren gehen. Ich möchte indes nicht unerwähnt lassen, daß gerade nach den neuesten Forschungen Gripenbergs die Lichtwirkung am größten ist, wenn Licht- und Stromrichtung parallel gehen, was bei der genannten Anordnung angenähert der Fall ist.

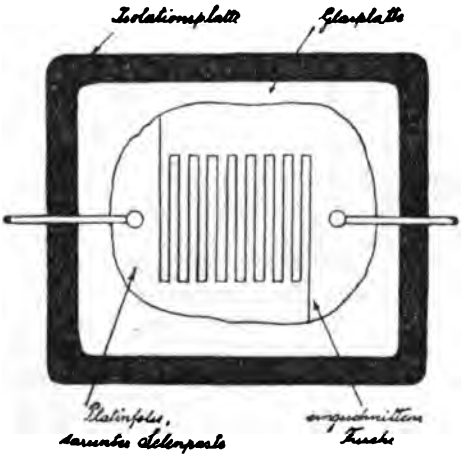


Fig. 35.

Lindner und Replogle (379, 400) haben am 12. 12. 1911 in den Vereinigten Staaten von Amerika die in Fig. 35 abgebildete Form einer gravierten Zelle zum Patent angemeldet unter der Bezeichnung „Eine neue Form der Selenzelle". Bei derselben wird das Selen auf die Gravierung in Form einer Paste aufgetragen. Diese Zelle unterscheidet sich von der durch mich bereits viel früher angegebenen Zellenform (S. 53) nur dadurch, daß die Selenschicht wesentlich dicker und somit die Wirkung geringer ist.

Salviati (344) stellte Druckkontakt-Selenzellen dadurch her, daß er nach dem Vorschlage von Marc (282) kristallinisches Selen in zerstäubtem Zustande gegen die gravierte Platte preßte, um die unvermeidliche chemische Verbindung des Selens mit der Metallunterlage während des Erhitzungsprozesses auszuschalten. Da diese Zellen jedoch sehr hohen Widerstand aufweisen, schmolz er später das Selen bei möglichst tiefer Temperatur auf die gravierte Platte auf und ließ es nachher unter mäßigem Druck langsam auskristallisieren.

Druckkontakt-Selenzellen wurden von Gripenberg (332) in der Weise gebaut, daß er gesondert hergestellte Selenscheiben gegen eine gravierte Platte preßte. Dadurch werden nicht bloß chemische Verbindungen des Selens mit dem Elektrodenmaterial, sondern auch Kontaktänderungen, die bei Abkühlung infolge von Rissen entstehen, vollständig vermieden. Diese Zellen besitzen aber sehr hohen Widerstand, so daß sie für technische Zwecke nicht in Betracht kommen.

Selenscheiben wurden übrigens bereits viel früher von vielen Forschern, insbesondere von Righi (97) zum Studium der elektrischen Eigenschaften des Selens verwendet und zwar wurden dieselben gewöhnlich zwischen 2 Metallplatten oder 2 Drahtnetzen eingeklemmt. Die Herstellung derartiger Selenscheiben macht keine Schwierigkeiten; man schmilzt auf einer Glasplatte eine kleine Menge Selen, preßt eine 2. Glasplatte darauf und führt das Selen in die kristallinische Form über. Nach der Abkühlung löst sich die Selenscheibe meist ohne Schwierigkeiten von der Glasplatte los. Wird Selen zwischen 2 Glasplatten geschmolzen, von denen die eine möglichst kalt, die andere sehr heiß ist, so haftet das Selen nach der Kristallisation an der heißen (Gripenberg 332).

Gitter für gravierte Selenzellen fertigt die Firma Spindler und Hoyer in Göttingen.

2. Gruppe.

Bei den Zellen der 2. Gruppe ist die Licht- und Stromrichtung parallel, die Lichtstrahlen durchdringen die Selenschicht in der Richtung des Stromes. Im allgemeinen ist der Bau dieses Zellentyps arg vernachlässigt worden. Sollte es sich

bewahrheiten, was Tyndall, White und Gripenberg (S. 43) bei ihren Versuchen gefunden, daß nämlich der Lichteffekt am größten ausfällt, wenn Licht- und Stromrichtung parallel gehen, so müßte die Elektrotechnik dem Baue dieses Zellentypes die größte Aufmerksamkeit schenken. Die Anordnungen, mittels deren die genannten Forscher zu dem merkwürdigen Resultate kamen, wurden bereits oben angeführt.

Die ersten Selenzellen, bei denen die Lichtrichtung parallel der Stromrichtung verläuft, wurden von Fritts (78) hergestellt. Dieser Zellentyp wurde bald darauf von Uljanin (98) wesentlich verbessert.

Fritts überzog eine Messingplatte mit einer feinen amorphen Selenschicht und bedeckte diese mit einem dünnen lichtdurchlässigen Goldblatt. Dieses Präparat wurde nachher durch einen Erhitzungsprozeß sensibilisiert. Verbindet man die Messingplatte mit dem einen, das Goldblatt mit dem anderen Pol einer Stromquelle, so geht der Strom vom Goldblatt durch die Selenschicht nach der Messingplatte über oder auch umgekehrt; die Stromrichtung ist also senkrecht zu den Elektroden. Die Belichtung der Selenschicht erfolgt durch das Goldblatt hindurch, also parallel zur Stromrichtung.

Während bei der Frittsschen Anordnung die Belichtung nur durch das Goldblatt erfolgen kann, läßt sich bei der Zelle von Uljanin die Selenschicht bequem von beiden Seiten her belichten. Uljanin versah 2 dünne Glasplatten auf einer Seite mit einem durchsichtigen Platinüberzug, bedeckte diesen mit einer feinen Selenschicht und preßte die zwei Platten so aufeinander, daß die Selenschicht zwischen den beiden Platinspiegeln eingeschlossen war. Um eine direkte Berührung der Platinbelege zu vermeiden, brachte er zwischen dieselben an einigen Stellen dünne Glimmerplättchen. Solange das Selen amorph ist, haften die zwei Glasplatten fest aneinander, nach der Kristallisation aber zerfällt das Präparat. Daher muß man das Präparat vor der Sensibilisation mit einer Vorrichtung versehen, durch welche die Platinspiegel fest gegeneinander gepreßt werden. Die Stromzu- und -ableitung erfolgt durch die beiden Platinbelege. Platinspiegel haben vor dem Blattgold den Vorzug, daß sie das ganze Spektrum fast gleichmäßig geschwächt hindurchlassen.

Weniger empfiehlt sich der von Righi (97) eingeschlagene Weg. Er überzog eine Metallplatte mit einer feinen kristallinischen Selenschicht und preßte gegen diese ein Drahtnetz, durch das er die Selenoberfläche belichten konnte. Infolge des losen Kontaktes Selen-Drahtnetz besitzt diese Anordnung höheren Widerstand als die Frittssche.

Zum Studium der elektrischen Eigenschaften des Selens hat man vielfach dünne Selenscheibchen, die gesondert in der

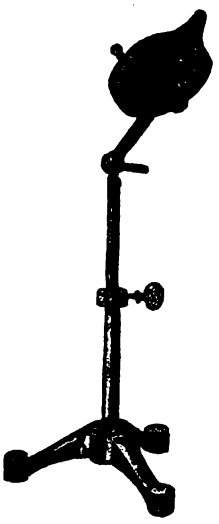


Fig. 36.

auf Seite 57 beschriebenen Weise hergestellt worden waren, zwischen Platinspiegeln oder Drahtnetzen festgeklemmt (Uljanin 89, Righi 97).

Ersetzt man die eine Metallelektrode durch einen Elektrolyt, so erhält man ein elektrisches Selenelement, das wir in Kap. XV gesondert behandeln wollen.

Die Fig. 36—38 enthalten Abbildungen von gebrauchs-

Fig. 37.

Fig. 38.

Fig. 39.

fähigen Zellen in lichtdicht abgeschlossenen Kästchen, wie sie von den Firmen geliefert werden. Fig. 39 stellt die neueste Form der gravierten Selenzellen von Presser in Hartgummifassung dar.

Mit der Fabrikation von Selenzellen beschäftigen sich u. a. folgende Firmen:

Clausen & v. Bronk, Berlin-Treptow, Defreggerstr. 2;
Spezialität: Drahtzellen (flach und zylindrisch).
R. Fürstenau, Berlin, Kurfürstenstr. 146;
Spezialität: Röntgenstrahl-Zellen.
E. Presser, Berlin-Treptow, Defreggerstr. 22;
Spezialität: Gravierte Zellen.
Kipp & Zonen, Delft (Holland);
Spezialität: Drahtzellen.
W. S. Gripenberg, Masaby (Finnland);
Spezialität: Gravierte Zellen.

Der Preis einer guten Selenzelle im gewöhnlichen Format beträgt 30—60 Mark. Bei Bestellung sollte immer außer der Größe womöglich auch der Zweck der Verwendung angegeben werden, da sich die Zellen nicht für alle Fälle in gleicher Weise eignen.

Selenapparate fertigt die Firma Elektrovulkan in Nürnberg, Kobergerstr. 79.

IV. Widerstand und Lichtempfindlichkeit des Selens.

Hittorf (5) entdeckte im Jahre 1851, daß das Selen in der kristallinischen Modifikation den elektrischen Strom leitet. 22 Jahre später beobachtete W. Smith (14) bei Kabelmessungen auffallende Schwankungen seiner Selenwiderstände. May, ein Assistent von Smith, forschte nach der Ursache der merkwürdigen Erscheinung und fand, daß die elektrische Leitfähigkeit des graukristallinischen Selens bei Belichtung beträchtlich ansteigt. Die Entdeckung dieser wunderbaren Eigenschaft des Selens, der Lichtempfindlichkeit, erregte die Aufmerksamkeit weiter Kreise, da man sich von ihr die Lösung gewaltiger Probleme versprach. W. Smith selbst drückte seine Begeisterung in folgenden Worten aus: „Mit Hilfe eines Mikrophons kann man das Laufen einer Fliege so laut hören, daß es dem Trampeln eines Pferdes auf einer hölzernen Brücke gleichkommt; aber noch viel wunderbarer ist es meiner Meinung nach, daß ich mit Hilfe des Telephons einen Lichtstrahl auf eine Metallplatte fallen hörte."

Die Wirkung des Lichtes auf das graukristallinische Selen, wie wir es durch einen Erhitzungsprozeß oder Behandlung mit Chinolin aus der amorphen Form gewinnen, besteht darin,

daß mit dem Auffallen der Strahlen seine elektrische Leitfähigkeit ansteigt bezw. sein Widerstand abnimmt und bei Verdunkelung im allgemeinen der ursprüngliche Dunkelwert wieder eintritt. Obwohl seit der Entdeckung der Lichtempfindlichkeit des Selens auch an mehreren anderen Körpern von hohem Widerstande die gleiche Erscheinung beobachtet wurde, hat das Interesse an dem Selen nicht nachgelassen, da keiner der anderen Körper diese Eigenschaft in gleich hohem Maße besitzt. Aber auch die einzelnen Selenpräparate zeigen ganz bedeutende Unterschiede in der Lichtempfindlichkeit und zwar je nach dem Bau der Zelle und der Art der Kristallisation.

Kristallinisches Selen, das man durch Erhitzen amorphen Selens auf nur 130—170° C erhält, zeigt im allgemeinen hohen Widerstand und schwache Lichtempfindlichkeit. Steigert man die Erhitzungstemperatur, so bekommt man Präparate von weit besserer Leitfähigkeit und guter Lichtempfindlichkeit. Im allgemeinen erfolgt die Sensibilisation des Selens bei Temperaturen in der Gegend von 200° C. Hält man während des Kristallisationsprozesses die Temperatur auf 200° längere Zeit konstant, so nimmt die Leitfähigkeit und die Lichtempfindlichkeit des Präparates zu. Während aber die Leitfähigkeit ihr Maximum erst nach einer Erhitzungsdauer von 24 und mehr Stunden erreicht (S. 26), nimmt die Lichtempfindlichkeit schon nach wenigen Stunden nicht mehr weiter zu. Das fortgesetzte „Glühen" hat also auf die Lichtempfindlichkeit keinen Einfluß mehr. Kühlt man ein Präparat, das bis zur Erreichung der maximalen Leitfähigkeit auf mehr als 200° C gehalten worden war, rasch auf Zimmertemperatur ab, so wächst seine Leitfähigkeit mit der Abkühlung zu immer größeren Werten an (S. 26). Die Lichtempfindlichkeit dieses Präparates ist bei Zimmertemperatur ungefähr gleich Null. Die Zelle behält aber bekanntlich die hohe Leitfähigkeit bei Zimmertemperatur nicht bei; dieselbe fällt vielmehr zuerst rasch, dann immer langsamer bis zu einem Minimum ab. Mit dieser Abnahme der Leitfähigkeit ist eine Zunahme der Lichtempfindlichkeit verbunden; es nimmt also bei einer derartigen Zelle die Lichtempfindlichkeit zugleich mit dem Widerstande zu.

Um die Zunahme von Widerstand und Empfindlichkeit mit einander vergleichen zu können, habe ich (315) ein Präparat mehrere Tage auf 196° C erhitzt und dann rasch gekühlt. Mit der Abkühlung fiel der Widerstand, wie zu erwarten war, auf ein Minimum ab, um nachher bei Zimmertemperatur wieder anzusteigen. Es wurde nun Tag für Tag sowohl der Widerstand als auch die Lichtempfindlichkeit, d. h. die Widerstandsabnahme bei stets gleicher Belichtung gemessen. Die Resultate des Versuches sind aus den beiden Kurven in

Fig. 40 zu ersehen. Kurve I veranschaulicht die Widerstandszunahme, Kurve II die Empfindlichkeitszunahme innerhalb 20 Tagen nach der Herstellung. Man sieht, daß beide einem Maximum zustreben, das offenbar von der Empfindlichkeitskurve früher erreicht wird als von der Widerstandskurve. Auch dieser Versuch zeigt uns wieder, wie berechtigt die Forderung ist, eine Selenzelle nach der Herstellung längere Zeit im Dunkeln ruhen zu lassen, bis sich Widerstand und Lichtempfindlichkeit Gleichgewichtswerten genähert haben. Ich will nun noch einige andere Beispiele anführen, aus denen hervorgeht, daß Widerstand und Lichtempfindlichkeit sich gewöhnlich im gleichen Sinne ändern und daß hohe Lichtempfindlichkeit im allgemeinen mit hohem Widerstand verbunden ist und umgekehrt.

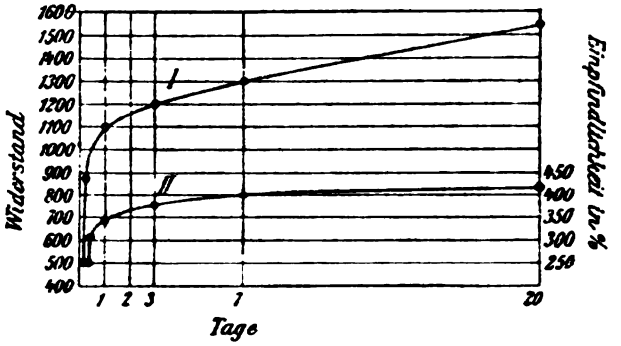


Fig. 40.

Gripenberg (396) machte an einer gravierten Zelle mit sehr dünner Selenschicht folgende Beobachtung. Der Widerstand hatte die enorme Höhe von 600 Millionen Ohm, die Lichtempfindlichkeit war außerordentlich groß, indem der Widerstand in unmittelbarer Nähe einer kleinen Öllampe von ca. 4,5 cm Flammenhöhe auf den tausendsten Teil sank.

Nach einigen Monaten hatte der Dunkelwiderstand einen weiteren Zuwachs erfahren und bei gleich starker Belichtung fiel er nunmehr auf 1/2300 des Dunkelwertes herab.

Brown (347) gewann amorphes Selen durch Auflösen glasigen Selens in Zyankali und darauffolgende Ausfällung durch Salzsäure. Das ausgeschiedene rote Pulver wurde zunächst mit Wasser und dann in Alkohol und Äther gewaschen. Ferner stellte er kristallinisches Selen dadurch her, daß er amorphes pulveriges Selen in Schwefelkohlenstoff brachte und mehrere Stunden durch direktes Sonnenlicht bestrahlte. Dann mischte er das amorphe und kristallinische Selen im Verhältnis 10:1, rührte das Gemisch mit Äther zu

einer dicken Paste an und erhitzte nach Verdampfung des Äthers das Präparat 5 Stunden auf 170° C. Die Abkühlung nahm 2 Stunden in Anspruch. Zellen dieser Art hatten einen Widerstand von vielen Millionen Ohm und eine Empfindlichkeit, die ungefähr das 10fache einer normalen Zelle betrug.

Gerade das entgegengesetzte Verhalten zeigten Zellen von Brown (347), bei denen das Selen in Formen aus glasiertem Porzellan bei 110° kristallisiert wurde. Bei einem Dunkelwiderstand von etwa 100 Ohm trat selbst bei intensiver Bestrahlung nur eine Widerstandsänderung von etwa einem Ohm auf.

So sehen wir, daß die einen Zellen hohen Widerstand mit höchster Empfindlichkeit vereinigen, während andere bei geringem Widerstand nur ganz schwache Lichtempfindlichkeit aufweisen. Es gelingt aber auch durch äußere Einflüsse (Wechselstrom, Feuchtigkeit, Druck, Metallzusätze, Vorbelichtung, Spannungsänderung, Temperaturwechsel) Widerstand und Lichtempfindlichkeit in dem gleichen Sinne zu beeinflussen. Bringt man z. B. eine Selenzelle in feuchte Luft, so sinkt zugleich mit dem Widerstand die Empfindlichkeit; bei nachherigem Austrocknen nehmen beide ihren ursprünglichen Wert wieder an (Ries 383). Nach Kalischer (92) und Pochettino (253, 337) wächst der Widerstand zugleich mit der Empfindlichkeit bei Behandlung einer Zelle mit Wechselströmen oder elektrischen Entladungen; nach einiger Zeit kehrt die Zelle von selbst in den früheren Zustand zurück. Setzt man ferner den Widerstand einer Zelle durch Anwendung einer höheren Spannung herab, so erleidet auch die Empfindlichkeit einen entsprechenden Verlust (Ries 383, 406, Pochettino 382); legt man wieder die frühere Spannung an, so nähern sich Widerstand und Empfindlichkeit wieder ihren ursprünglichen Werten. Durch Metallzusätze zum Selen lassen sich Widerstand und Empfindlichkeit dauernd herabsetzen. Ferner werden durch Vorbelichtung Widerstand und Empfindlichkeit zugleich verringert. Besonders interessant sind die Empfindlichkeitsänderungen bei größeren Temperaturschwankungen, worauf wir später (S. 88) eingehen werden.

Die angeführten Beispiele mögen genügen, den innigen Zusammenhang von Widerstand und Lichtempfindlichkeit zu zeigen. Die Tatsache, daß hohe Lichtempfindlichkeit gewöhnlich mit hohem Widerstand verbunden ist, kann nun keineswegs als erfreulich für den Techniker bezeichnet werden. Denn für technische Zwecke eignen sich diejenigen Selenzellen am besten, die möglichst niedrigen Dunkelwiderstand mit recht hoher Lichtempfindlichkeit vereinigen. Es ist demnach klar, daß die Firmen, die sich mit der Fabrikation von Selenzellen beschäftigen, vor eine sehr schwierige Aufgabe gestellt sind.

Der spezifische Widerstand des graukristallinischen Selens wechselt natürlich beträchtlich von Präparat zu Präparat je nach der Herstellung desselben; von besonderem Einfluß ist, wie wir gesehen haben (S. 28), die Höhe der Erhitzungstemperatur, die Dauer der Erhitzung, die Art der Abkühlung, die Reinheit und Trockenheit des Materials, sowie die Natur des Elektrodenmaterials. Wir dürfen uns daher nicht wundern, wenn die einzelnen Forscher zu recht verschiedenen Resultaten gelangt sind. So findet Siemens (21, 26) für den spezifischen Widerstand des graukristallinischen Selens den Wert $3{,}76 \cdot 10^5$, Weidert (234) $2{,}39 \cdot 10^5$. Schrott (258) erhielt für den Widerstand eines Zentimeterwürfels in Ohm den Wert $2{,}52 \cdot 10^6$; das Präparat war aus dem Schmelzfluß durch fünfstündige Erhitzung auf 195° C gewonnen und später nochmals zwei Stunden auf 210—215° C erhitzt worden. In allen Fällen, in denen kristallinisches Selen gepulvert und zu Zylindern gepreßt wurde, erhielt Schrott noch wesentlich höhere Widerstände. Selen, das durch längeres Stehen in Chinolin kristallinisch gemacht und zu Zylindern gepreßt worden war, hatte sogar einen Widerstand von $6{,}8 \cdot 10^8$ Ohmzentimeter bei 20° C. Der spezifische Widerstand des Selens wurde nur in ganz einzelnen Fällen bestimmt; dagegen finden wir Angaben über den Widerstand von Selenzellen in sehr vielen Arbeiten. Die zu technischen Zwecken verwendeten Zellen haben gewöhnlich einen Widerstand von 10000—100000 Ohm; der mittlere Widerstand einer guten Selenzelle kann also zu 50000 Ohm angegeben werden.

Bidwell (84, 123) fand, daß Leitfähigkeit und Lichtempfindlichkeit des Selens durch Zusatz von kleinen Metallmengen erhöht wird. Er stellte aus verschiedenen Selenproben, die teils gereinigt, teils unrein waren, Zellen her und untersuchte sie auf ihren Widerstand und ihre Empfindlichkeit. Da die mit Metallbeimengungen versetzten Präparate eine größere Leitfähigkeit aufwiesen als die aus möglichst reinem Selen hergestellten, so nahm Bidwell an, daß ganz reines Selen ein Nichtleiter sei. Daß diese Anschauung unrichtig ist, wurde früher (S. 25) schon festgestellt. Bidwell will aber auch beobachtet haben, daß kleine Metallzusätze die Lichtempfindlichkeit des Selens erhöhen; er kommt daher zu dem Resultat, daß die Metallbeimengungen, die Selenide, die Ursache der Leitfähigkeit und Lichtempfindlichkeit des Selens sind. Lichtempfindliche Selenzellen kann man nach seiner Meinung nur mit Elektroden erhalten, welche Selenide zu bilden imstande sind. Es ist natürlich ohne weiteres klar, daß Metallbeimengungen die Leitfähigkeit des Selens erhöhen müssen; dagegen steht die Beobachtung, daß gleichzeitig die Empfindlichkeit zunehme, ganz im Widerspruch mit unseren früheren Ausführungen über den Zusammenhang von Widerstand und

Lichtempfindlichkeit. Wir müßten eher das Gegenteil erwarten. Es ist an und für sich schon recht schwer, festzustellen, welchen Einfluß Metallzusätze auf die Lichtempfindlichkeit eines Präparates ausüben können, da man niemals 2 Präparate vollständig gleich herstellen kann. Selbst bei vollständig gleicher Behandlung können 2 Präparate recht verschiedene Lichtempfindlichkeit aufweisen. Es ist aber auch durch direkte Beweise gelungen, die Bidwellsche Anschauung zu widerlegen. So haben Berndt (201) und Pfund (215) an Zellen aus ganz reinem Selen unter Anwendung von Kohlenelektroden, die keine Selenide zu bilden imstande sind, recht deutliche Empfindlichkeit festgestellt. Die Lichtwirkung ist also im Selen selbst zu suchen. Auch hat sich ergeben, daß die Empfindlichkeit durch Metallbeimengungen gar nicht erhöht, sondern sogar verringert wird; Metallzusätze in ganz geringen Mengen haben nur die Wirkung, daß sich die Zelle rascher in die Gleichgewichtslage (S. 32) einstellt (Uljanin 98, Marc 282, Sperling 292). An dieser Stelle will ich auch noch auf eine Arbeit von Amaduzzi und Padoa (389) hinweisen, nach der die Empfindlichkeit von Mischungen aus Selen und Schwefel mit Zunahme des Schwefelgehaltes beständig abnimmt. Nachdem wir früher schon (S. 43) festgestellt haben, daß die Wirkung des Lichtes auch nicht auf einer Widerstandsverringerung des Kontaktes Selen—Elektrode beruht, kommen wir nunmehr zu dem Schlusse: **Die Lichtempfindlichkeit ist eine Eigenschaft des Selens selbst.** Wir werden übrigens auf diesen Punkt im Abschnitt XVII ausführlich eingehen.

Soll die Lichtempfindlichkeit mehrerer Zellen verglichen werden, so muß man natürlich die Messungen immer unter gleichen Verhältnissen vornehmen. Die Empfindlichkeit von Zellen wird in den einzelnen Arbeiten verschieden angegeben (506). Die Berechnung der Empfindlichkeit ist in den meisten Fällen nach einer der folgenden Formeln ausgeführt worden, in denen W_d den Dunkelwiderstand, W_b den Widerstand bei Belichtung und E die Empfindlichkeit der Zelle bezeichnet:

$$\text{I.)}\quad E = \frac{W_d}{W_b}$$

$$\text{II.)}\quad E = \frac{W_d}{W_b} - 1$$

$$\text{III.)}\quad E = \left(\frac{W_d}{W_b} - 1\right) \cdot 100.$$

Ist z. B. der Widerstand der Zelle im Dunkeln gleich 50 000 Ohm, im Lichte 5000 Ohm, so ergibt sich nach I. $E = 10$ d. h. die Leitfähigkeit ist im Lichte 10 mal so groß als im Dunkeln.

Nach II. findet man E = 9 d. h. die Leitfähigkeit ist im Lichte um das Neunfache größer als im Dunkeln.

Aus Formel III ergibt sich E = 900 d. h. die Leitfähigkeitszunahme im Lichte beträgt 900% von der Dunkelleitfähigkeit.

Keine dieser Angaben gibt indes darüber Aufschluß, was den Techniker eigentlich interessiert, nämlich über die lichtelektrische Leistung, die mit der Zelle erzielt werden kann. Bei Verwendung einer Selenzelle zu technischen Zwecken muß man im allgemeinen mit dem Differenzstrom von Licht und Dunkel arbeiten, den wir im folgenden kurz den lichtelektrischen Strom oder den Selenstrom heißen wollen. Bezeichnet man die angelegte Spannung mit V, den Zellenwiderstand im Dunkeln mit Wd, den Widerstand der Belichtung mit W_b, die zugehörigen Stromstärken mit J_d bezw. J_b, so muß der lichtelektrische Strom an verschiedenen Zellen um so größer sein, je größer bei gleicher Lichtintensität

$$J_b - J_d = \frac{V}{W_b} - \frac{V}{W_d} = V \cdot \frac{W_d - W_b}{W_d \cdot W_b}$$

Bei einer bestimmten Lichtstärke läßt sich also ein um so größerer Stromeffekt erzielen, je höher die Betriebsspannung gewählt werden kann und je größer der Quotient

$$\frac{W_d - W_b}{W_d \cdot W_b}$$

ist. Dieser Quotient hat z. B. bei einer Zelle, deren Dunkelwiderstand 10 000 Ohm beträgt und bei Belichtung auf die Hälfte sinkt, den Wert 0,0001. Hat eine Zelle aber einen Widerstand von 1 000 000 Ohm, der bei der gleichen Beleuchtungsstärke auf 40 000 Ohm, also auf $^1/_{25}$ sinkt, so wird der Quotient gleich 0,000 024, also nicht einmal ein Viertel des vorigen. Nach der Empfindlichkeitsformel I

$$E = \frac{W_d}{W_b}$$

findet man für die erste Zelle die Empfindlichkeit 2, für die zweite 25 und doch gibt die erste Zelle bei gleicher Lichtintensität und gleicher Spannung einen mehr als viermal so großen Stromeffekt. Nun verträgt aber die 2. Zelle sicherlich eine höhere Strombelastung als die erste, sodaß bei Anlegung der höchstzulässigen Spannungen der Stromeffekt bei der 2. Zelle eine entsprechende Erhöhung erfährt. Maßgebend ist indes nicht der Stromeffekt, sondern der Watteffekt d. h. das Produkt aus Spannung und Stromeffekt. Denn in einem angeschlossenen Nutzapparat z. B. einem Galvanometer, einem Relais u. dergl. ist immer der erzielte Watteffekt ausschlag-

gebend; je mehr Spannung man hat, desto mehr Drahtwindungen kann beispielsweise ein Relais haben. Wir drücken also die Lichtempfindlichkeit am besten durch folgende Formeln aus:

$$\text{I.) Stromeffekt} = V \cdot \frac{W_d - W_b}{W_d \cdot W_b}$$

$$\text{II.) Watteffekt (Nutzeffekt)} = V^2 \cdot \frac{W_d - W_b}{W_d \cdot W_b}$$

Von den beispielsweise angeführten zwei Zellen ergibt sich für die erste bei Anwendung einer halb so großen Spannung immer noch ein größerer Strom- und Watteffekt als für die zweite. Die Spannung an einer Zelle kann durchaus nicht proportional mit dem Widerstand erhöht werden; der Spannungserhöhung ist vielmehr bald eine Grenze gesetzt. Auch ist zu beachten, daß mit Erhöhung der Spannung die Leitfähigkeit und Lichtempfindlichkeit beträchtlich herabgesetzt wird. Daraus ergibt sich die Tatsache, daß man mit Zellen niedrigeren Widerstandes und mäßiger Empfindlichkeit im allgemeinen einen größeren Effekt erzielen kann als mit Zellen großen Widerstandes und höchster Empfindlickeit. In vielen Fällen wäre die Angabe des Effektes einer Zelle für schwache und für starke Lichtintensität bestimmter Größe sowohl zu Beginn der Bestrahlung als auch nach einer gewissen Bestrahlungszeit sehr erwünscht.

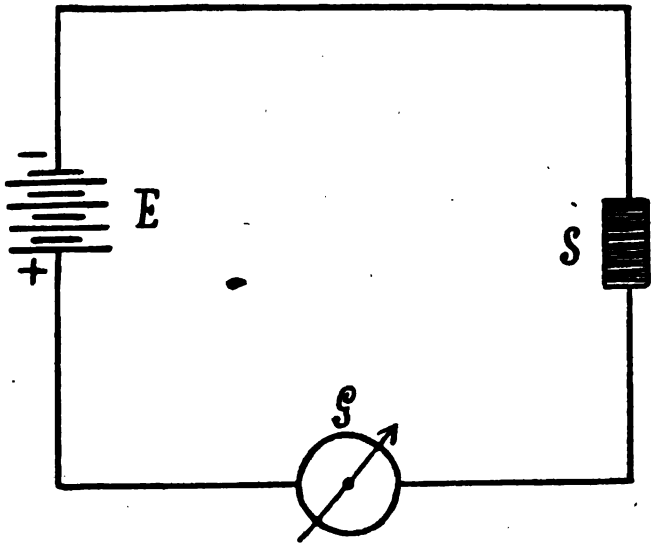


Fig. 41.

Bildet man einen Stromkreis (Fig. 41) aus einer Stromquelle E, einer Selenzelle S und einem Galvanometer G, so läßt sich die Stromstärke oder die Empfindlichkeit des Galvanometers jeder Zeit so regeln, daß dieses nur einen geringen Ausschlag macht, solange die Zelle im Dunkeln liegt. Bestrahlt man die Selenzelle kräftig, so sinkt ihr Widerstand beträchtlich, die Stromstärke im Stromkreis steigt an und der Galvanometerausschlag vergrößert sich entsprechend. Die Zunahme des Ausschlages ist ein Maß für den Lichteffekt. Bei

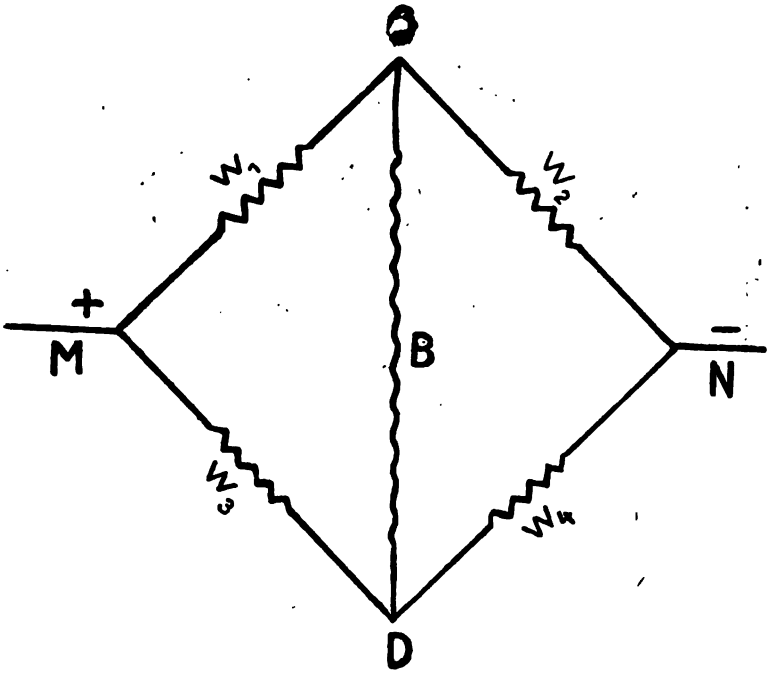


Fig. 42.

intensiver Beleuchtung kann die Leitfähigkeit bezw. Stromstärke den 10-, 100-, ja 1000-fachen Wert annehmen. Bei schwachen Lichteindrücken ist die angegebene Schaltung ungeeignet zur Messung; man verwendet in diesem Falle gewöhnlich die Brückenschaltung. Fig. 42 veranschaulicht die Einrichtung der Wheatstoneschen Brücke. Der Strom fließt von M nach N durch die Verzweigung. w_1, w_2, w_3 w_4 sind 4 Widerstände, die in verschiedenen Zweigen liegen. Die von C über B nach D führende Leitung heißt man die Brücke. Durch diese Brücke fließt kein Strom, wenn

$$w_1 : w_2 = w_3 : w_4.$$

Die vollständige Schaltung ist in Fig. 43. angegeben. A ist eine Akkumulatorenbatterie oder sonst eine Stromquelle, von der mittels des Widerstandes R eine beliebige elektromotorische Kraft abgezweigt werden kann. Man legt das Galvanometer G oder den zu betätigenden Apparat in die Brücke und die lichtelektrische Zelle Z in einen Zweig. Die Widerstände w_1, w_2, w_3 werden so abgeglichen, daß $w_1 : w_2 = w_3 : w_z$ wo w_z der Widerstand der Zelle ist; die Brücke ist dann stromlos, das Galvanometer zeigt keinen Ausschlag. Belichtet

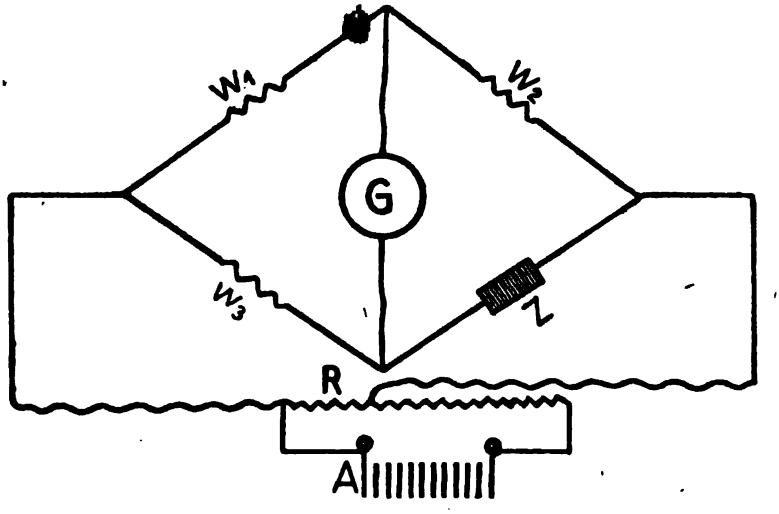


Fig 43.

man die Zelle, wodurch ihr Widerstand sinkt, so ist die angegebene Proportion nicht mehr erfüllt; durch die Brücke fließt ein Strom, der das Galvanometer ablenkt bezw. den eingeschaltenen Apparat betätigt. Die Schaltung kann auch in der Weise vorgenommen werden, daß man Stromquelle und Galvanometer vertauscht.

Verwendet man bei dieser Anordnung ein empfindliches Galvanometer, so kann man auch sehr kleine Widerstandsänderungen der Selenzelle und somit ganz geringe Lichteindrücke feststellen. Während sich bei der in Fig. 41 angegebenen Hintereinanderschaltung der Apparate der lichtelektrische Strom (Selenstrom) zu dem schon im Dunkeln vorhandenen Strom (Dunkelstrom) addiert und somit bei geringer Stärke nicht zum Ausdruck kommen kann, wird bei der Brückenschaltung nur der lichtelektrische Strom vom Galvanometer angezeigt; daher muß diese Anordnung bei entsprechender Empfindlichkeit des Meßinstrumentes noch einen ganz schwachen Lichtschein zu messen gestatten.

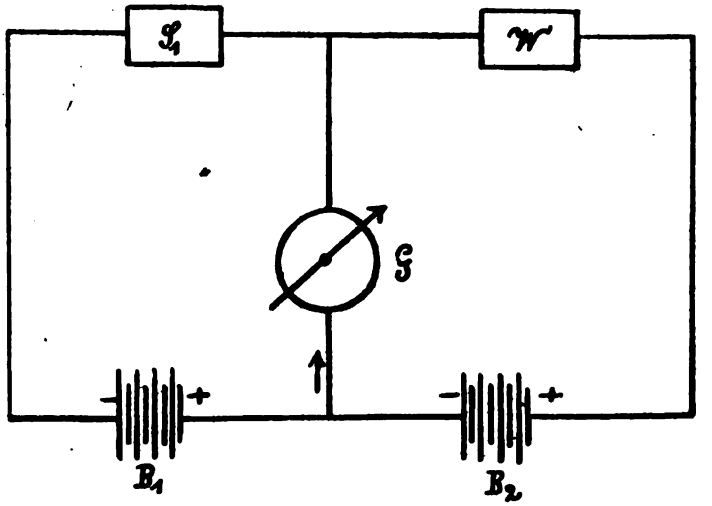


Fig. 44.

Eine andere Einrichtung, die ebenfalls ganz schwache Selenströme anzeigt, ist in Fig. 44 abgebildet. B_1 und B_2 sind zwei gegen einander geschaltete Stromquellen von gleicher Stärke, S_1 eine Selenzelle, W ein beliebiger Widerstand, der so reguliert werden kann, daß das in der Brücke liegende Galvanometer G stromlos wird. Fällt nun Licht auf die Zelle S_1, so fließt der Strom durch die Brücke und das Galvanometer. Diese Kompensationsschaltung besitzt sehr gute Wirkung, hat aber den Nachteil, daß zwei Stromquellen nötig sind.

Ganz merkwürdige Änderungen der Leitfähigkeit zeigen die Selenzellen, wenn sie längerer Zeit einer Lichtquelle von konstanter Intensität ausgesetzt werden. Je nach der Herstellung der Zelle ist der zeitliche Verlauf der Leitfähigkeitsänderungen ein ganz anderer. Die drei Kurven in Fig. 45 veranschaulichen den Verlauf der Leitfähigkeitsänderungen, die während einer 5 Minuten dauernden Bestrahlung und der nachfolgenden Abdunkelung an 3 Drahtzellen, welche verschiedenen Erhitzungsprozessen unterworfen worden waren, beobachtet wurden. Kurve I bezieht sich auf eine Zelle, die bei ca. 170° sensibilisiert wurde; Kurve II wurde mit einer Zelle erhalten, die ungefähr 1 Std. auf 200° erhitzt und mäßig rasch gekühlt worden war; Kurve III schließlich zeigt uns das Verhalten von Zellen, die mehrere Stunden auf 200—210° erhitzt und langsam gekühlt oder durch Kristallisiereen aus dem Schmelzfluß erhalten wurden. Während in den beiden ersten Fällen die Leitfähigkeit erst rasch, dann immer langsamer anwächst, um sich allmählich einem Maximum zu nähern, erreicht die Leitfähigkeit im dritten

Falle das Maximum fast momentan mit dem Auffallen der Lichtstrahlen, fällt dann erst rasch, dann immer langsamer ab und nähert sich asymptotisch einem Minimum. Nach der Verdunkelung kehrt die Leitfähigkeit nicht momentan auf ihren Dunkelwert zurück, bei der Zelle I erfolgt der Rückgang

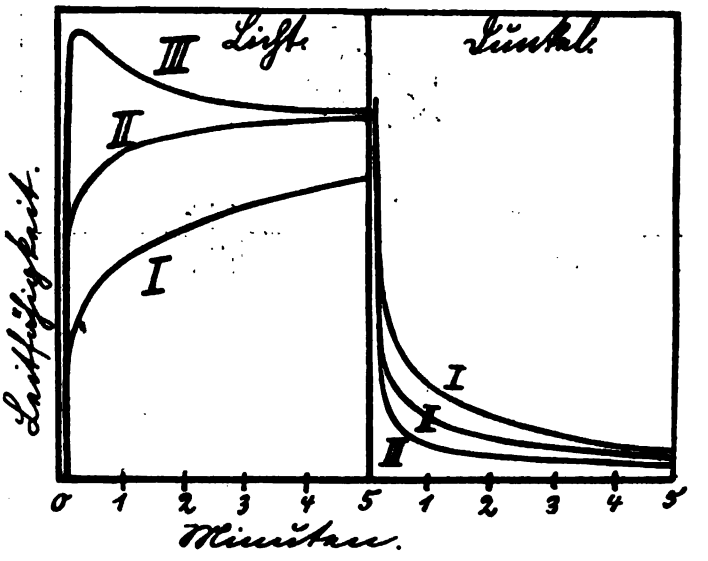


Fig. 45.

am langsamsten, bei III am raschesten; selbst nach 5 Minuten langer Verdunkelung ist der ursprüngliche Wert noch nicht erreicht. Die Selenzelle behält also gleichsam von den Lichteindrücken etwas zurück. Wir bezeichnen diese Erscheinung als Trägheit des Selens und zwar unterscheiden wir zwischen Belichtungsträgheit und Verdunkelungsträgheit. Aus den Kurven ersehen wir, daß letztere größer ist als die Belichtungsträgheit. Die Trägheit ist der größte Fehler der Selenzelle, sie setzt die Bedeutung des Selens für technische Zwecke wesentlich herab; besonders das „Nachhinken" der Zelle nach der Belichtung wirkt sehr störend.

Während die Zellen I und II während der Belichtung einem Maximum zustreben, das oft erst nach Stunden erreicht wird, nähert sich III einem Minimum. Die Leitfähigkeitsabnahme der letzteren Zelle während der Bestrahlung bezeichnen wir als Ermüdung. Da die Lichtempfindlichkeit der Zellen, die Ermüdungserscheinungen zeigen, meist bedeutend größer ist als die der anderen, so liegt das Minimum der Leitfähigkeit bei jenen gewöhnlich noch höher als das Maximum

bei der I. und II. Art. Weil die Zellen der II. und III. Art verhältnismäßig mehr auf schwache Lichteindrücke reagieren, während die der I. Art für schwaches Licht wenig empfindlich sind, heißt man erstere auch weiche, letztere harte Zellen. Die ausführliche Behandlung der Trägheitserscheinungen kann erst im Kapitel IX erfolgen.

Schaltet man eine Selenzelle in einen Stromkreis ein und belichtet sie mit Licht von wechselnder Stärke, so entstehen Stromschwankungen, die den Lichtschwankungen im allgemeinen entsprechen. Will man diese Stromschwankungen dauernd festhalten, so benutzt man als Meßapparat ein registrierendes Galvanometer mit Schreibstift und ablaufender Papierrolle. Fig. 46 stellt einen solchen Meßapparat der Firma Hartmann

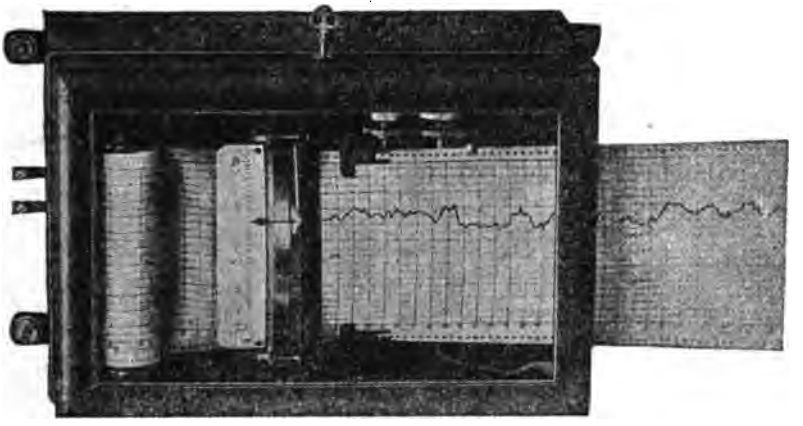


Fig. 46.

& Braun dar. Da aber derartige Instrumente gewöhnlich nicht die nötige Empfindlichkeit besitzen, bedient man sich meistens eines Oszillographen, d. h. eines Saitengalvanometers (Fadengalvanometers) mit Registrierapparat. Es kommt bei diesem Instrument das Prinzip zur Anwendung, daß ein sehr dünner Leiter, der in einem kräftigen Magnetfeld senkrecht zur Kraftlinienrichtung angeordnet ist, abgelenkt wird, sobald ein Strom durch ihn hindurchgeht. Die Mitte des äußerst dünnen Fadens kann man mittels eines Miskroskops auf einen Spalt und einen dahinter befindlichen Film projizieren. Bei Bewegung des Films und des Fadens entwirft die Fadenmitte auf dem Film eine Kurve, Diese Lichtkurve entspricht den Faden- bezw. Stromschwankungen und veranschaulicht die Intensitätsänderungen der die lichtempfindliche Zelle beleuchtenden Lichtquelle. Als Faden benutzt man gewöhnlich einen versilberten Quarzfaden.

Bei dem in Fig. 47 abgebildeten sehr einfachen Saitengalvanometer ist zwischen den Polen eines Elektromagnets eine Schleife aus hartgezogenem Silberdraht ausgespannt. Fließt der Strom durch die Schleife, so werden die zwei Drähte in verschiedener Richtung durchflossen und infolgedessen nach verschiedenen Seiten abgelenkt. Ein an beiden Drähten in der Mitte befestigter Spiegel wird daher beim Stromdurchgang abgelenkt. Mittels einer entsprechenden Versuchsanordnung lassen sich die Schwingungen des Spiegels auf einen Film projizieren.

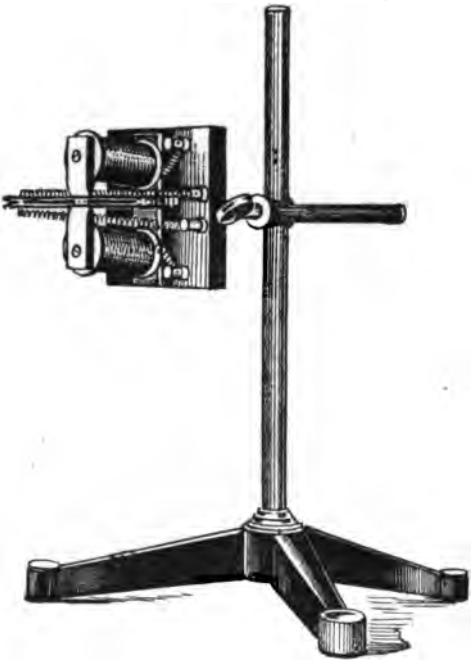


Fig. 47.

Die Größe der Ablenkung der Fadenmitte ist innerhalb gewisser Grenzen proportional der Stromstärke. Um sehr schnelle Ausschläge zu erzielen, zieht man den Faden möglichst straff an. Man kann es auf diesem Wege erreichen, daß die Dauer der Einstellung weniger als 0,01 Sekunden beträgt.

Bildet man einen Stromkreis aus einer Stromquelle, einer Selenzelle und einem Telephon und bestrahlt die Zelle mit Licht von wechselnder Stärke, so hört man im Telephon einen Ton, der mit der Geschwindigkeit der Belichtungsänderungen wechselt. Man kann sich durch das photophonische Rad (Fig. 48) davon überzeugen, daß in einer Selenzelle mehrere

tausend Widerstandsschwankungen in der Sekunde vorkommen können. Das photophonische Rad besteht aus einer runden, an ihrem Umfange mit Löchern versehenen Scheibe, die in rasche Umdrehung versetzt wird. Durch die Öffnungen kann man die Zelle, die mit einem Telephon verbunden ist, intermittierend belichten. Man hört in dem Telephon einen Ton von einigen tausend Schwingungen in der Sekunde, so daß die lichtelektrische Wirkung in weniger als $^1/_{1000}$ Sekunde eintreten muß.

Fig. 48.

Giltay (185) gibt für den Gebrauch von Selenzellen folgenden Rat. Es kommt zuweilen vor, daß eine Selenzelle plötzlich verdorben wird und Kurzschluß zeigt, ohne daß zu starke Erhitzung durch die Beleuchtung oder zu große Stromstärke als die Ursache der Erscheinung betrachtet werden kann. Nach Ansicht von Giltay ist die Ursache in dem Extrastrom zu suchen, der beim Unterbrechen der Leitung, z. B. beim Aufhören des Experimentes in dem mit der Zelle verbundenen Telephon, Galvanometer oder sonstigem Nutzapparat entsteht. Um diese Gefahr zu vermeiden, schaltet man, wenn ein Apparat von bedeutender Selbstinduktion mit einer Selenzelle in Verbindung gebracht werden soll, einen Stopfkommutator derart in die Leitung (Fig. 49), daß derselbe einen Kurzschluß zur Selenzelle bildet, sobald der Stopfen eingeschaltet ist. Soll nun bei Beendigung des Experimentes oder bei Abänderung desselben die Verbindung mit der Batterie unter-

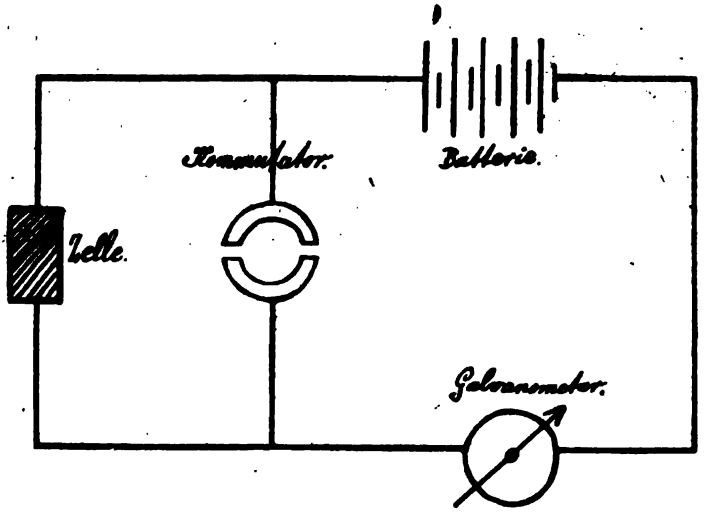


Fig. 49.

brochen werden, so wird immer zuerst der Stopfen in den Kommutator eingesteckt.

Bei allen wissenschaftlichen Versuchen und technischen Einrichtungen, bei denen eine Selenzelle einer längeren Bestrahlung ausgesetzt ist, empfiehlt es sich, die Wärmestrahlen nach Möglichkeit auszuschalten, indem man entweder zwischen Zelle und Lichtquelle eine die Wärmestrahlen absorbierende durchsichtige Substanz bringt oder die Selenzelle in ein Kühlgefäß einschließt. Erwärmung erhöht die Leitfähigkeit einer Selenzelle mit negativem Temperaturkoeffizienten des Widerstandes, wirkt also in demselben Sinne wie eine Bestrahlung. Dagegen wird bei einer Zelle mit positivem Temperaturkoeffizienten des Widerstandes die Leitfähigkeit durch Erwärmung herabgesetzt; in metallischem Selen rufen also Licht und Wärme entgegengesetzte Leitfähigkeitsänderungen hervor. Schließlich ist noch zu beachten, daß durch Temperaturänderungen auch die Lichtempfindlichkeit einer Zelle wesentlich beeinträchtigt wird.

V. Einfluß der Spannung auf Leitfähigkeit und Lichtempfindlichkeit.

Schon Adams (18) hat die Beobachtung gemacht, daß der Widerstand einer Selenzelle mit Zunahme der Spannung abnimmt und daß somit der spezifische Widerstand des Selens eine Funktion der elektromotorischen Kraft ist. Da nun mit einer Widerstandsabnahme im allgemeinen eine Verminderung der Lichtempfindlichkeit verbunden ist (S. 64), so müßte eine Vergrößerung der Spannung einen Rückgang der Lichtempfindlichkeit zur Folge haben. So naheliegend dieser Schluß lag, so ist der Zusammenhang von Spannung und Empfindlichkeit doch erst vor wenigen Jahren von mir (384) festgestellt worden. Es ergab sich die für Theorie und Praxis gleich wichtige Tatsache, daß die Lichtempfindlichkeit je nach der Art der Selenpräparate mit Vergrößerung der Spannung mehr oder minder abnimmt und daß mit diesem Empfindlichkeitsverlust eine beträchtliche Abnahme der Trägheit verbunden ist.

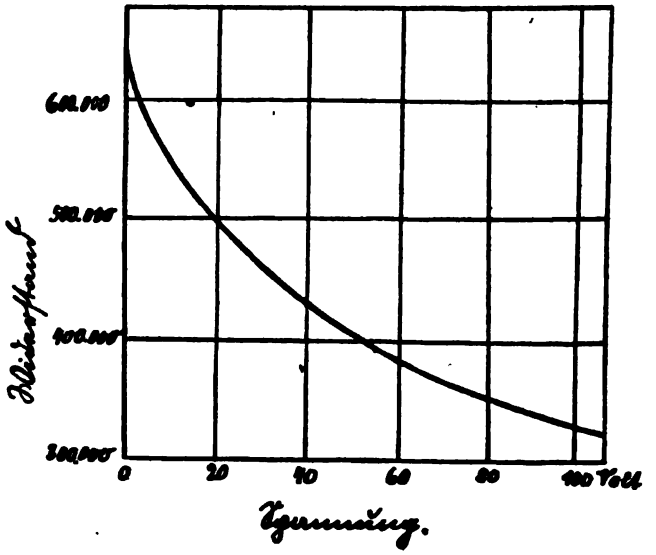


Fig. 50.

Die Abhängigkeit des Selenwiderstandes von der Spannung hat Lutenbacher (359) eingehend studiert; er nennt die Erscheinung Spannungseffekt. Die Kurve in Fig. 50

veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Widerstand und Spannung, wie ihn Luterbacher gefunden. Bei dem allmählichen Übergang von 1 auf 110 Volt sank der Widerstand auf ungefähr die Hälfte. Die Widerstandsabnahme war für niedrige Spannungen größer als für hohe bei gleicher Spannungssteigerung. Die Kurve des Spannungseffektes hat die Form einer Parabel.

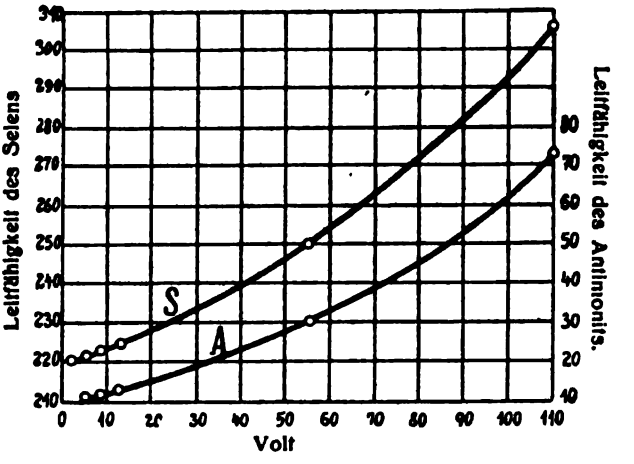


Fig. 51.

Da die von Luterbacher verwendeten Zellen wesentliche Polarisationsströme und eine eigene elektromotorische Kraft im Dunkeln besaßen, habe ich (384) die Versuche mit einer Zelle wiederholt, die einen positiven Temperaturkoeffizienten des Widerstandes hatte, also wie ein Metall leitete, und keine Spur von Polarisation zeigte. Die Kurve S in Fig. 51 veranschaulicht die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Spannung für Selen, Kurve A für Antimonit. Als abweichendes Resultat ergab sich, daß der Spannungseffekt für niedrige Spannungen kleiner war als für höhere bei gleicher Spannungssteigerung.

Bei Ausführung eines derartigen Versuches macht man die Beobachtung, daß der Dunkelwiderstand selbst bei konstanter Spannung nicht gleich bleibt; das Selen nimmt den einer bestimmten Spannung entsprechenden Widerstand nur allmählich an. Die Annäherung an das Minimum des Widerstandes geht bei jeder Spannung erst rasch, dann immer langsamer vor sich und zwar besonders langsam bei hohen Spannungen. Das Selen zeigt also auch im Dunkeln eine gewisse Trägheit. Unterbricht man den Strom nach längerem Durchgang einige Zeit, so nimmt der Widerstand wieder lang-

sam einen höheren Wert an. Geht man von einer höheren Spannung auf eine niedrigere über, so nähert sich auch der Widerstand dem dieser Spannung entsprechenden Wert wieder. Die Zelle bedarf aber einer gewissen Erholungszeit, bis sie auf ihren ursprünglichen Widerstand zurückgeht. Die Zeit der Erholung ist je nach der Zelle, der Höhe der Spannung und der Dauer der Einwirkung verschieden.

In Fig. 52 gibt die obere Kurve die von Mc. Dowell (329) beobachtete Widerstandsabnahme beim allmählichen Übergang von 2 auf 11 Volt an, während die untere Kurve die bei der Rückkehr zur ursprünglichen Spannung erhaltene Widerstandszunahme anzeigt. Im letzteren Falle fielen die Werte wesentlich niedriger aus, näherten sich aber bei den einzelnen Versuchen um so mehr den oberen Werten, je mehr Zeit der Zelle zur Erholung gelassen wurde.

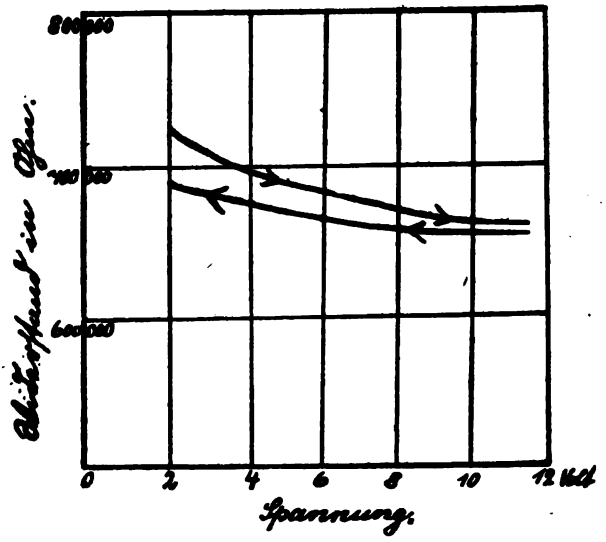


Fig. 52.

Die Kurve S in Fig. 53 gibt ein Bild von der Zunahme der Leitfähigkeit wie ich (384) sie bei einer konstanten Spannung von 110 Volt innerhalb 20 Minuten beobachtet habe. (A ist die entsprechende Kurve für Antimonit).

Der Spannungseffekt tritt nicht bei allen Zellenarten in gleicher Größe auf; manche Zellen verändern ihren Widerstand mit der Spannung nur wenig, bei anderen dagegen stellen sich mit Vergrößerung der Spannung ganz beträchtliche Widerstandsrückgänge ein. Es ist bisher nicht festgestellt, welche Zellenarten den Effekt besonders deutlich zei-

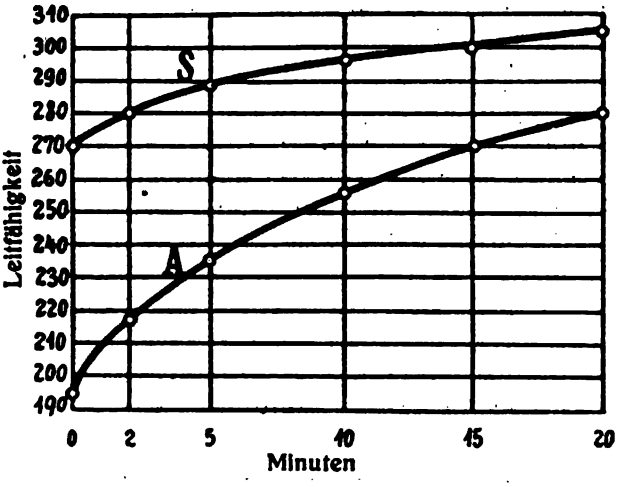


Fig 53.

gen. Alle Zellen, die für Spannungsänderungen besonders empfindlich sind, besitzen auch bei konstanter Spannung einen leicht veränderlichen Widerstand. So erhält man vielfach selbst beim Anlegen von nur 2 Volt in den ersten Minuten eine kleine Abnahme des Dunkelwiderstandes, der oft wieder eine geringe Zunahme folgt.

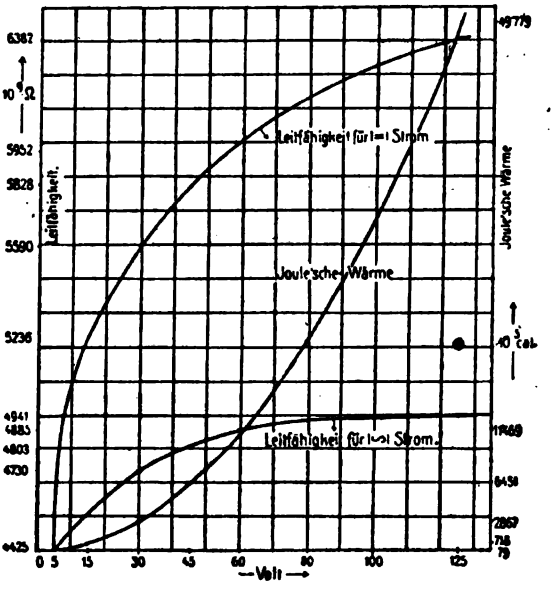


Fig. 54.

Eine auffallende Beobachtung hat Lutenbacher (359) gemacht, als er den Spannungseffekt für Gleichstrom und Wechselstrom bei gleichen elektromotorischen Kräften untersuchte. Die obere Kurve in Fig. 54 veranschaulicht die Leitfähigkeitszunahme bei Gleichstrom, die untere für Wechselstrom. Die Leitfähigkeitswerte wurden stets 30 Sekunden nach Stromschluß festgestellt. Jeder Messung mit Wechselstrom folgte diejenige mit Gleichstrom bei gleich hoher Spannung. Zwischen den einzelnen Versuchen wurden größere Pausen gemacht, damit sich die Zelle erholen konnte. Ein Blick auf die Figur läßt erkennen, daß der Spannungseffekt für Gleichstrom erheblich höher war als für Wechselstrom. Dieses merkwürdige Ergebnis läßt sich durch die Tatsache, daß sich die Zelle infolge der beständigen Stromunterbrechungen bei Wechselströmen wieder etwas erholen kann, sicherlich allein nicht erklären; es wird uns aber einigermaßen verständlich, wenn wir in Betracht ziehen, daß Wechselströme allgemein den Widerstand des Selens vorübergehend zu steigern vermögen (S. 173).

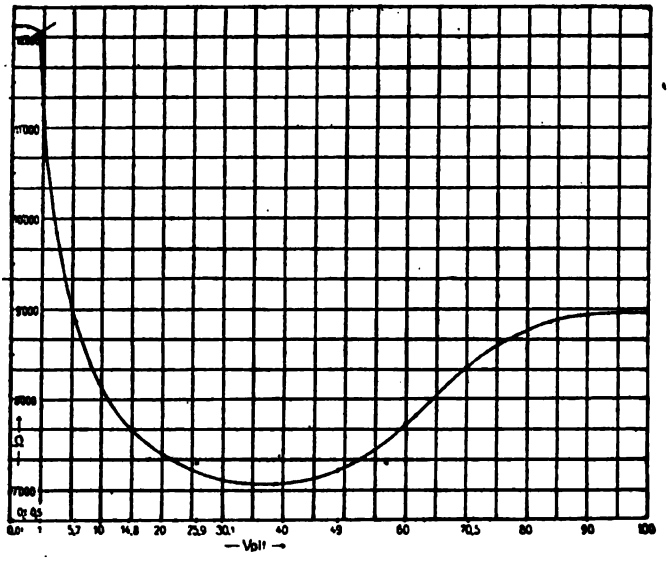


Fig. 55.

Eine Zelle von Luterbacher zeigte das in Fig. 55 dargestellte anomale Verhalten. Der Widerstand fiel von 1 bis 35 Volt Spannung ab und nahm nachher bis gegen 100 Volt wieder zu. Meines Erachtens beruht das auffallende Verhalten dieser Zelle auf einer geringen Feuchtigkeit bezw. Verunreinigung des Selens. Die Existenz eines anomalen

Spannungseffektes in feuchten Zellen habe ich mit Sicherheit nachgewiesen (S. 152). Sendet man durch eine feuchte Zelle einen Gleichstrom, so nimmt die Stromstärke erst rasch, dann langsam ab; der Widerstand, der sich dem Durchgang des Stromes entgegensetzt, nimmt also erst rasch, dann langsam zu. Vergrößert man die Spannung, so tritt eine weitere Widerstandszunahme ein. Während also der Dunkelwiderstand in einem normalen, trockenen Selenpräparat mit Zunahme der Spannung abfällt, wächst er in einer feuchten Zelle mit Vergrößerung der Spannung. Diese Erscheinung habe ich als anomalen Spannungseffekt bezeichnet. Je mehr man eine feuchte Zelle austrocknet, desto weniger deutlich tritt der anomale Spannungseffekt auf. Ist die Trocknung nahezu vollständig, so kann man bei kleinen Spannungen den normalen Spannungseffekt, also Widerstandsabnahme bei Spannungserhöhung beobachten, während bei hohen Spannungen der anomale Spannungseffekt sich einstellt. Das Präparat zeigt also nunmehr die von Luterbacher beobachtete Erscheinung. Wird die Zelle vollständig getrocknet, so zeigt sie auch bei hohen Spannungen nur mehr den normalen Spannungseffekt. Als Ursache des anomalen Verhaltens wurde mit Sicherheit Polarisation und Feuchtigkeitsabgabe während des Stromdurchganges festgestellt. Auf Grund dieser Beobachtungen glaube ich annehmen zu dürfen, daß die Luterbachersche Zelle eine Spur von Feuchtigkeit enthielt und daß daher eine Übereinanderlagerung des normalen und anomalen Spannungseffektes eintrat.

Eine ähnliche Beobachtung machte Kaempf (397), der oberhalb einer gewissen Spannung eine kleine Abnahme der Dunkelleitfähigkeit fand. Die Kurve „Dunkelstrom" in Fig. 55 veranschaulicht die Leitfähigkeitsänderungen bei einer Spannung von 2 bis 155 Volt. Kaempf schließt aus seinen Versuchsergebnissen, daß bei hohen Spannungen ein Sättigungsstrom auftritt. Die Tatsache, daß die Endwerte der Stromstärken etwas tiefer liegen als die Stromstärken bei geringeren Spannungen erklärt Kaempf auf folgende Weise: Beim Spannungseffekt existiert neben einer relativ langsamen, im Verlauf von Sekunden und Minuten eintretenden Vergrößerung der Leitfähigkeit eine fast momentan einsetzende Leitfähigkeitserhöhung, über welche jener allmähliche Prozeß sich lagert. Die allmähliche Leitfähigkeitsänderung besteht bei nicht allzu enormen Spannungen in einer Erhöhung; dagegen kehrt der Effekt bei Spannungen von solchem Betrag, daß beinahe Sättigungsströme erreicht werden, sein Vorzeichen um d. h. es wird durch den Stromdurchgang eine Leitfähigkeitsabnahme hervorgerufen. Es existiert also in ein und demselben Selenpräparat je nach der angelegten Spannung ein positiver oder negativer allmählicher

Spannungseffekt. Der negative Effekt wird natürlich um so weniger zum Ausdruck kommen, je kürzer bei jeder Leitfähigkeitsmessung der Strom geschlossen ist. So gelang es auch, durch Benutzung möglichst kurzer Meßzeiten mittels ballistischer Beobachtungen, den Fehler etwas herabzudrücken. Die Beobachtung von Luterbacher, daß die Dunkelleitfähigkeit des Selens bei steigender Spannung sich allmählich einem Maximum nähert, erklärt sich nach Kaempf dadurch, daß die angelegte Spannung noch nicht hoch genug war.

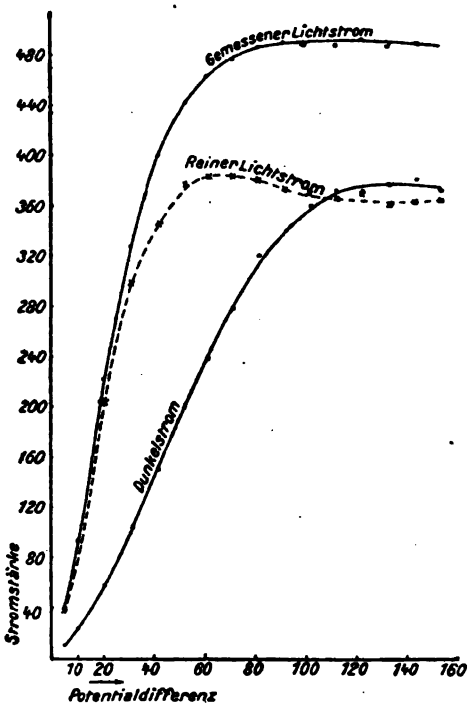


Fig. 56.

Diese von Kaempf vertretene Auffassung läßt sich mit den Versuchsergebnissen der übrigen Forscher nicht in Einklang bringen. Luterbacher fand eine allmähliche Annäherung der Leitfähigkeit an ein Maximum mit Zunahme der Spannung, Fournier d'Albe (329) beobachtete selbst bei Spannungen bis 800 Volt noch eine Leitfähigkeitszunahme und ich (384) kam sogar an einem metallischen Präparat zu dem auffallenden Resultat, daß der Spannungseffekt mit Erhöhung der Potentialdifferenz immer mehr wuchs. (Auf diesen Punkt werde ich noch zurückkommen.) Ferner widerspricht die

Kaempfsche Annahme, daß die allmähliche Leitfähigkeitsänderung, die sich über die momentane lagert, bei Erhöhung der Spannung immer mehr abnehme, direkt den Forschungsresultaten. Dagegen decken sich seine übrigen Annahmen, daß es sich um eine Übereinanderlagerung von 2 Vorgängen handelt und daß der negative Effekt von der Länge des Stromdurchganges abhängig sei, vollständig mit den von mir oben angegebenen Erklärungen über den anomalen Spannungseffekt. Wir dürfen daher annehmen, daß die Kaempfsche Zelle eine Spur von Feuchtigkeit besaß, die weniger durch Polarisation als durch Verdampfung an Stellen größter Stromdichte wirkte.

Die Kurve „Gemessener Lichtstrom" in Fig. 56 gibt die Stromstärke bei Belichtung an, die Kurve „Reiner Lichtstrom" zeigt die Differenz der Stromstärken im Licht und Dunkeln. Bei diesen beiden Kurven sind die Ordinaten gegenüber der des „Dunkelstromes" im Maßstab 1:3 gezeichnet.

Was meine Beobachtung an dem metallischen Präparat betrifft, so konnte ich bei Anwendung noch höherer Spannungen als 110° die Erfahrung machen, daß die Isolation manchmal nicht mehr ausreichte. Da mir von meinen Versuchen mit Antimonitzellen bekannt war, daß bei derartigen Messungen auf gute Isolation besondere Sorgfalt zu legen ist, war ich nicht überrascht. Ich habe daher meine Selenzellen zu den maßgebenden Versuchsreihen vollständig in Paraffin eingeschmolzen und die Zuleitungsdrähte kurz gewählt und gut isoliert. Ob bei Verwendung hoher Spannungen der Temperaturkoeffizient von Einfluß auf die Erscheinung ist, wäre noch zu untersuchen.

Fournier d'Albe (392) erhielt für Spannungen von 1 bis 800 Volt die Beziehung

$$\frac{R_1 - R_v}{R_1} = F \log V,$$

wo R_1 der Widerstand bei 1 Volt, R_v derjenige bei V Volt und F eine Konstante bedeutet, die mit der Zellenart verschieden ist und zwischen 0,1 und 0,5 liegt.

Die Abhängigkeit des Spannungseffektes von der Temperatur wurde von mir (384) an drei Zellen untersucht. Von diesen besaßen die Zellen I und II negativen Temperaturkoeffizienten des Widerstandes, Zelle III verhielt sich unterhalb 25° C wie ein Metall, oberhalb 30° hatte sie negativen Temperaturkoeffizienten.

Die Präparate befanden sich bei der Erwärmung in einem mit Paraffin gefüllten Gefäß. Da die Leitfähigkeit bei Konstanthalten der Temperatur Hysteresiserscheinungen (S. 26) zeigte, so mußte bei jeder Messung wenigstens bis zur Erreichung annähernder Konstanz gewartet werden. Dies nimmt

geraume Zeit in Anspruch. Bei meinen Versuchen wurde bei jeder Beobachtungstemperatur nur so lange gewartet, bis sich die Leitfähigkeit innerhalb einer Minute nicht mehr stärker änderte. Dann wurden statt 2 Volt rasch 110 Volt angelegt und nach 15 Sekunden die Leitfähigkeit bestimmt, so daß die bei jeder Temperatur nötigen 2 Messungen in weniger als einer Minute erledigt werden konnten. Fig. 57 zeigt das Verhalten

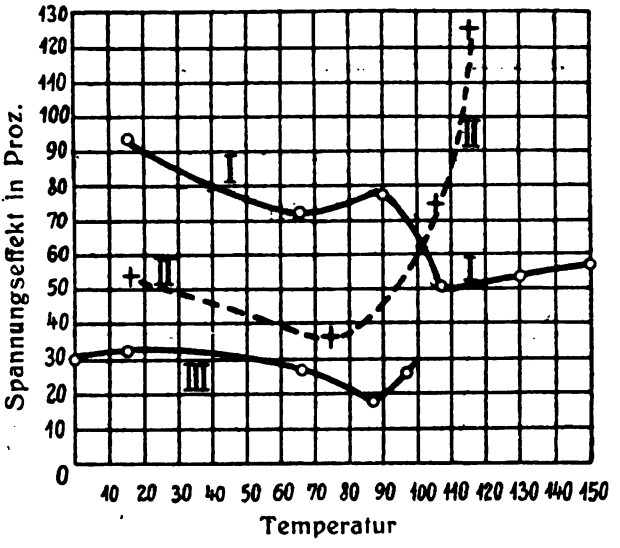


Fig. 57.

der drei Zellen von 0 bis 150° C; als Effekt ist angegeben die Leitfähigkeitszunahme, berechnet in Prozenten der Leitfähigkeit bei 2 Volt. Unterhalb 90° zeigen die drei Präparate geringere Änderungen des Spannungseffektes als oberhalb dieser Temperatur. Diese plötzliche Änderung in der Gegend von 90° ist offenbar durch die nunmehr einsetzenden inneren Umlagerungen im Selen veranlaßt. Die zwischen 0 und 90° beobachteten Differenzen des Spannungseffektes erklären sich hauptsächlich durch die Hysteresiserscheinungen bei der Erwärmung; da bei jeder Beobachtungstemperatur nicht so lange gewartet wurde, bis der Widerstand keinerlei Änderung mehr erfuhr, so waren die gemessenen Leitfähigkeiten für Selen mit negativem Temperaturkoeffizienten des Widerstandes alle zu klein, für metallisches Selen zu groß. Daher nimmt auch der Spannungseffekt für metallisches Selen von 0 bis 25° C zu, dann wieder ab, während die 2 anderen Zellen von Anfang an Abnahme zeigen. Man darf annehmen, daß bei allen Temperaturen, die keine inneren Umlagerungen her-

vorrufen, der Spannungseffekt annähernd konstant ist, wenn man mit den Messungen bis zur Erreichung konstannter Widerstände wartet.

Brown (455) untersuchte den Spannungseffekt an einem Selenkristall bei niedrigem und hohem Druck. Bei niedrigem Druck nahm die Leitfähigkeit infolge Steigerung der Spannung von 1,4 auf 143 Volt um 416 % der bei 1,4 Volt beobachteten Leitfähigkeit zu (Kurve I in Fig. 58), während bei hohem Druck die entsprechende Zunahme nur 33 % betrug (Kurve II).

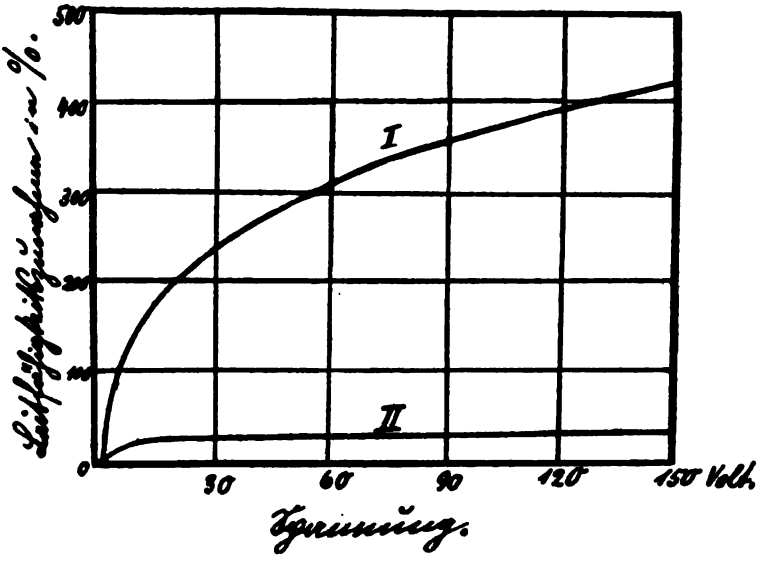


Fig. 58.

Um zu untersuchen, ob der Spannungseffekt vielleicht die Folge der in der Selenzelle auftretenden Wärmeentwicklung ist, hat Luterbacher (359) die in der Zelle erzeugte Joule'sche Wärme aus Widerstand und Spannung berechnet. Die entsprechende Kurve der Jouleschen Wärme ist in Fig. 54 eingezeichnet; ihr Verlauf zeigt, daß der Spannungseffekt nicht die Folge der Wärmeentwicklung sein kann. Einwandfrei ergibt sich die Richtigkeit dieser Behauptung aus meinen Versuchen an metallischem Selen, das die Erscheinung deutlich zeigt, obwohl jede Erwärmung eine Abnahme der Leitfähigkeit bewirkt.

Auch Polarisation kommt als Ursache des Spannungseffektes nicht in Betracht, da meine metallischen Zellen selbst nach 30 Minuten langem Anlegen von 110 Volt nicht eine Spur von Polarisation zeigten. Übrigens ist ja die Erscheinung

auch bei Wechselstrom zu beobachten. Aus dem gleichen Grunde ist es auch unmöglich, daß ungleiches Erwärmen der Kontakte der Zelle durch den Meßstrom die Ursache sei; bei der großen Leitfähigkeitsänderung müßte die Wärmedifferenz so groß sein, daß nach dem Ausschalten der Stromquelle ein deutlicher Thermoeffekt auftreten müßte.

Um Gewißheit darüber zu erlangen, ob die momentane oder allmähliche Leitfähigkeitszunahme bei Vergrößerung der Spannung etwa nur ein Vorgang ist, der sich an einer Elektrode abspielt, ließ ich den Strom mehrmals etwa eine halbe Stunde durch eine metallische Zelle gehen und kehrte dann den Strom plötzlich um. Die Zelle besaß nun auch in der umgekehrten Richtung die vergrößerte Leitfähigkeit; offenbar ist also eine Widerstandsänderung des Selens selbst eingetreten. Ein etwas geringerer Ausschlag nach der Stromwendung erklärt sich durch die Erholung der Zelle infolge der Stromunterbrechung.

Die Lichtempfindlichkeit nimmt mit Vergrößerung der Spannung je nach der Art des Selenpräparates mehr oder minder ab (Ries 384, 406, 427, Pochetino 382). Wenn einige Forscher (Glatzel 375, Brown 455) die Abnahme der Lichtempfindlichkeit mit Zunahme der Spannung nicht beobachten konnten, so liegt dies daran, daß entweder die Differenz der angelegten Spannung nur sehr gering war oder das Präparat den Spannungseffekt nur schwach zeigte. Die Empfindlichkeitsabnahme läßt sich am besten an Zellen mit hohem Spannungseffekt feststellen.

Bei schwacher Belichtung und 2 Volt Spannung erhielt ich an einer Zelle eine Empfindlichkeit von 190 %, bei 110 Volt eine solche von 113 %. Es war also eine deutliche Empfindlichkeitsabnahme eingetreten. Als ich nachher sofort wieder 2 Volt anlegte, betrug die Empfindlichkeit 132 % und nahm dann wieder zu. Demnach wird die einer bestimmten Spannung entsprechende Lichtempfindlichkeit durch vorübergehendes Anlegen einer höheren Spannung herabgedrückt. Die Zelle behält aber bei der niedrigeren Spannung den tiefen Empfindlichkeitswert nicht dauernd bei, sondern erholt sich wieder und nähert sich erst rasch, dann langsam seinem Normalwert.

Aus den zahlenmäßigen Angaben von Kaempf (397) ist zu ersehen, daß die Lichtempfindlichkeit unter 20 Volt ungefähr konstant blieb, von 20—100 Volt aber rasch abnahm; die weiteren Änderungen wollen wir übergehen, da die Zelle dann ein anomales Verhalten annahm.

Über den Einfluß der Spannung auf die Trägheitserscheinungen vergl. S. 143.

Da in einer Selenzelle mit einer Widerstandsabnahme im allgemeinen auch eine Empfindlichkeitsabnahme verbunden

ist, kann uns der Rückgang der Lichtempfindlichkeit bei Vergrößerung der Spannung nicht auffallen. Worauf beruht nun aber der Spannungseffekt? Meiner Meinung (384) nach handelt es sich bei dem Spannungseffekt bezw. bei der momentanen und allmählichen Leitfähigkeitszunahme um eine Leitfähigkeitsänderung des Selens selbst, hervorgerufen durch eine Auslösung von Elektronen aus dem Atom. Stromerhöhung wirkt auf das Selen ähnlich wie das Licht; beide vergrößern seine elektrische Leitfähigkeit. Auch zeigt das Selen schon im Dunkeln die bekannten Trägheitserscheinungen. Legt man eine Zeitlang eine höhere Spannung an, so wird für jede tiefere Spannung die Leitfähigkeit vorübergehend erhöht. Die gleiche Wirkung hat das Licht; nach jeder Steigerung der Lichtintensität ist die Leitfähigkeit für eine geringere Lichtstärke vorübergehend vergrößert. Ferner ist nach Anwendung einer höheren Spannung bezw. einer größeren Lichtintensität die Lichtempfindlichkeit der Zelle für jede niedrigere Spannung bezw. Lichtstärke vorübergehend vermindert. Nehmen wir nun an, daß diese gleichartigen Erscheinungen die gleiche Ursache haben, so beruht der Spannungseffekt auf einer Auslösung von Elektronen aus dem Selen. Unter dem Einflusse der elektrischen Kraft werden Elektronen vom Atom losgetrennt, so daß die Zahl der für den Stromtransport zur Verfügung stehenden Elektronen und somit die Leitfähigkeit wächst. Für die Annahme von elektronischen Vorgängen beim Spannungseffekt hat sich auch Kaempf (397) ausgesprochen.

VI. Der Einfluß der Temperatur auf die Lichtempfindlichkeit.

Da die elektrische Leitfähigkeit einer Selenzelle bei Temperaturwechsel starken Änderungen unterworfen ist und zwischen Leitfähigkeit und Lichtempfindlichkeit eine sehr enge Beziehung (S. 62) besteht, so muß mit jeder Temperaturänderung eine Empfindlichkeitsänderung verbunden sein. Erwärmen wir ein vollständig kristallisiertes Selenpräparat mit negativem Temperaturkoeffizienten des Widerstandes von Zimmertemperatur bis gegen den Schmelzpunkt, so beobachten wir eine fortgesetzte Leitfähigkeitszunahme. Da nun eine Leitfähigkeitserhöhung eine Abnahme der Lichtempfindlichkeit zur Folge hat, muß bei einem Präparat dieser Art mit jeder Temperatursteigerung ein Empfindlichkeitsverlust verbunden sein. Der Versuch bestätigt die Richtigkeit dieser Überlegung. Die Lichtempfindlichkeit einer gut auskristallisierten Selenzelle mit negativem Temperatur-

koeffizienten des Widerstandes nimmt bei Erwärmung von Zimmertemperatur bis gegen den Schmelzpunkt erst rasch, dann langsamer ab, um in der Gegend von 200° ganz zu verschwinden (Schrott 258, Sperling 292, Ries 315, Brown u. Stebbins 304 u. a.)

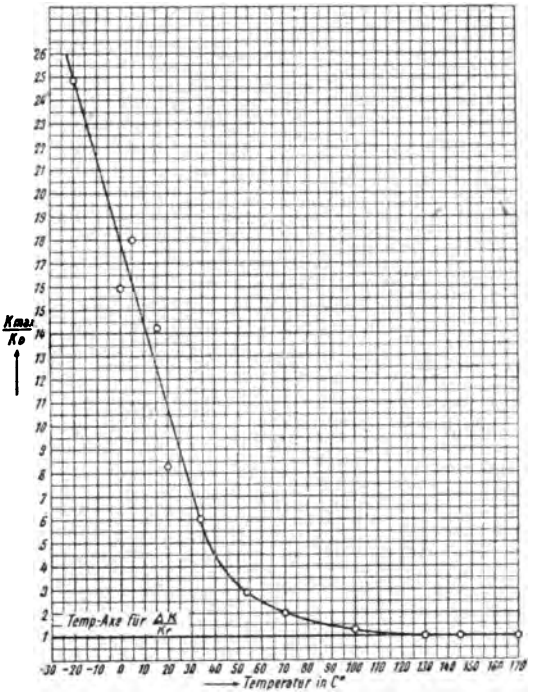


Fig. 59.

Fig. 59 veranschaulicht die von Sperling beobachtete Empfindlichkeitsabnahme bei Erwärmung von —20° bis +170° C. Die Empfindlichkeit wurde gemessen durch die maximale relative Leitfähigkeitszunahme an einem Präparat, das die sogenannte Ermüdung (S. 72) zeigte. Die zur Erreichung des Leitfähigkeitsmaximums nötige Zeit nahm bei Temperaturerhöhung immer mehr ab und zwar von 3,5 Sekunden bei —20° bis 0,0136 Sekunden bei 170°. Bei —20° C war die Lichtempfindlichkeit auffallend groß, in der Nähe von +5° C unregelmäßig.

Die Kurve in Fig. 60 zeigt die Empfindlichkeitsabnahme bei Temperatursteigerung, wie ich (315) sie an Präparaten mit negativem Temperaturkoeffizienten des Widerstandes beobachtet habe. Als Empfindlichkeit wurde die Leitfähigkeitszunahme, berechnet in Prozenten des Dunkelwertes, auf der

Ordinate aufgetragen. Die Kurve stimmt in ihrem Verlaufe mit der Schrottschen sehr gut überein.

Daß die Lichtempfindlichkeit unter Null Grad sehr groß ist, wurde schon von Pochettino (170, 382) beobachtet. Er fand ein Maximum der Lichtempfindlichkeit bei —40° C; bei der Temperatur der flüssigen Luft war die Empfindlichkeit nur um 25 % geringer als bei Zimmertemperatur.

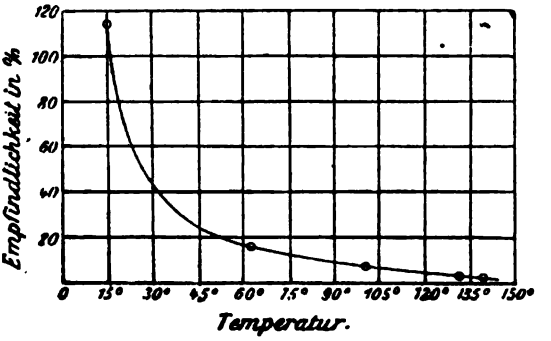


Fig. 60.

Wenn die Lichtempfindlichkeit sich in gleichem Sinne wie der Widerstand des Selens ändert, so müßte eine Zelle mit negativem Temperaturkoeffizienten des Widerstandes eine immer höhere Lichtempfindlichkeit annehmen, je weiter wir mit der Temperatur unter Null Grad heruntergehen. Wenn nun Pochettino bei —40° ein Maximum erhielt, so brauchen wir deswegen nicht anzunehmen, daß der bekannte Zusammenhang zwischen Widerstand und Lichtempfindlichkeit nur innerhalb gewisser Temperaturgrenzen gilt. Es ist vielmehr sehr wahrscheinlich, daß bei —40° C ein Wendepunkt in der elektrischen Leitfähigkeit der benützten Selenzelle lag. Wissen wir doch (S. 27), daß alle bei hohen Temperaturen hergestellten Präparate innerhalb gewisser Temperaturgrenzen, die sich mit der Zeit leicht verschieben, einen positiven Temperaturkoeffizienten des Widerstandes haben und daß eben dieser Temperaturbereich vielfach unterhalb der Zimmertemperatur liegt. Es scheint mir daher wahrscheinlich, daß das von Pochettino untersuchte Präparat unterhalb —40° innerhalb eines wahrscheinlich engen Temperaturbereiches einen positiven Temperaturkoeffizienten des Widerstandes aufwies. Aus dem genannten Zusammenhang zwischen Widerstand und Empfindlichkeit ergäbe sich ferner, daß eine Zelle mit metallischer Leitfähigkeit bei Temperatursteigerung immer größere Lichtempfindlichkeit erhalten müßte. Leider besitzen metal-

lische Selenpräparate immer nur innerhalb sehr enger Temperaturgrenzen einen positiven Temperaturkoeffizienten des Widerstandes, so daß der Empfindlichkeitssteigerung eine nahe Grenze gesetzt wäre.

Meine Anschauung (508), daß die Lichtempfindlichkeit sich in gleichem Sinne wie der elektrische Widerstand ändere und daß ein Wendepunkt in der Widerstandskurve auch einen Wendepunkt in der Empfindlichkeitskurve bedinge, scheint mir ein Versuch von Marc (192) vollständig zu bestätigen.

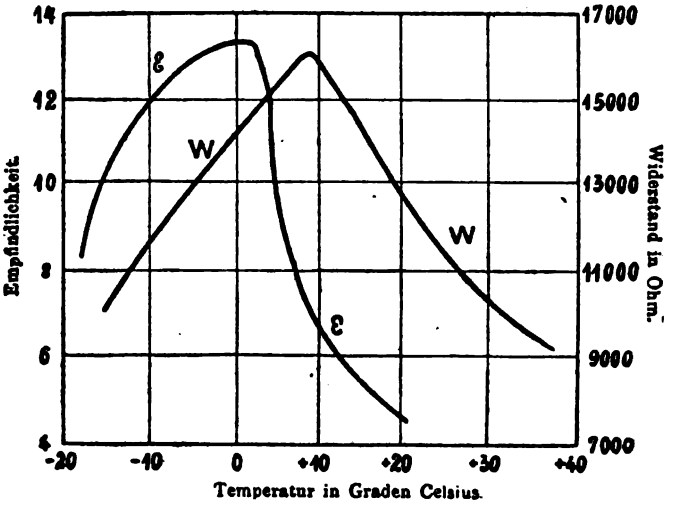


Fig. 61.

In Fig. 61 geben die Kurven W und E die Veränderungen des Widerstandes bezw. der Empfindlichkeit mit der Temperatur für ein und dasselbe Präparat von Marc an. Beide Kurven besitzen zwischen 0 und 10° einen Wendepunkt und zwar ein Maximum; Widerstand und Empfindlichkeit gehen also nahezu parallel. Daß beide Höchstwerte nicht vollständig zusammenfallen, kann durchaus nicht auffallen, da bei derartigen Versuchen Stunden vergehen, bis der Widerstand für die jeweilige Temperatur auch nur annähernd konstant geworden ist. Wir sehen, wie die Empfindlichkeit zugleich mit dem Widerstande scharf ansteigt und wieder rasch abfällt. Zur Beleuchtung wurde bei dem beschriebenen Versuche blaues Licht verwendet, bei roter Belichtung ergab sich eine ähnliche Empfindlichkeitskurve.

Glatzel (394) hat die Empfindlichkeit eines Präparates in dem Temperaturbereich von 0 bis —70° festgestellt und eine

fortgesetzte Empfindlichkeits- und Widerstandszunahme bei abnehmender Temperatur erhalten (Fig. 62).

Wenn es gelänge, ein metallisch leitendes Präparat herzustellen, das auch bei hohen Temperaturen noch metallische Leitfähigkeit aufweist, so ließe sich durch Temperaturerhöhung die Empfindlichkeit beträchtlich steigern. Leichter gelingt dies sicher durch starke Abkühlung eines Präparates mit negativem Temperaturkoeffizienten des Widerstandes. Keines der beiden Verfahren hat indes für praktische Zwecke besondere Bedeutung, da die Empfindlichkeitssteigerung in beiden Fällen mit einer beträchtlichen Widerstandserhöhung verbunden ist und für die Praxis nicht die Empfindlichkeit einer Zelle, sondern der Strom- bezw. Nutzeffekt maßgebend ist (S. 68).

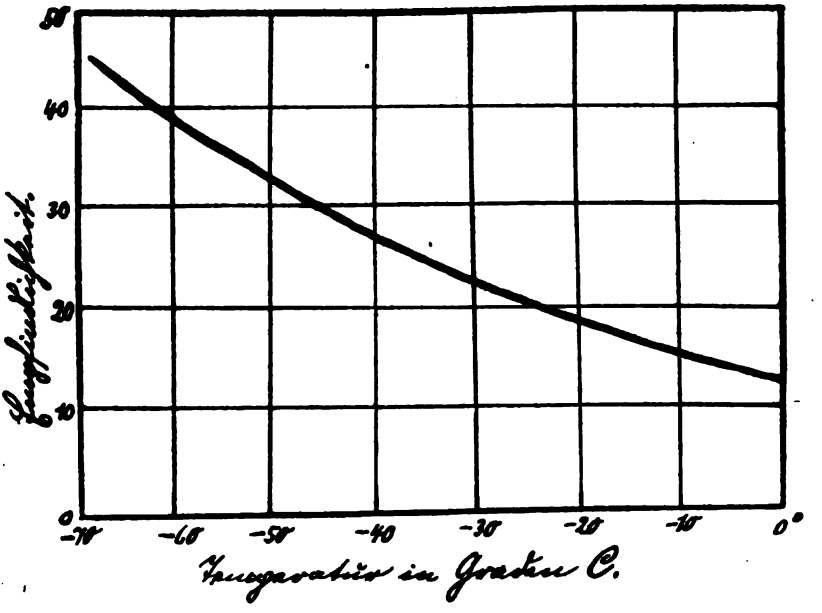


Fig. 62.

Selenpräparate, die nicht vollständig kristallisiert sind, zeigen bei Temperatursteigerung bis in die Gegend des Schmelzpunktes infolge molekularer Umwandlungen große Veränderungen der Lichtempfindlichkeit. Schrott (258) erhitzte ein amorphes Selenpräparat 1 Stunde in destilliertem Wasser bei 100°, wobei es schwarz geworden war, kühlte es dann ab und erwärmte es nun langsam bis 210°. Die Kurve in Fig. 63 veranschaulicht die Empfindlichkeitsänderungen bei

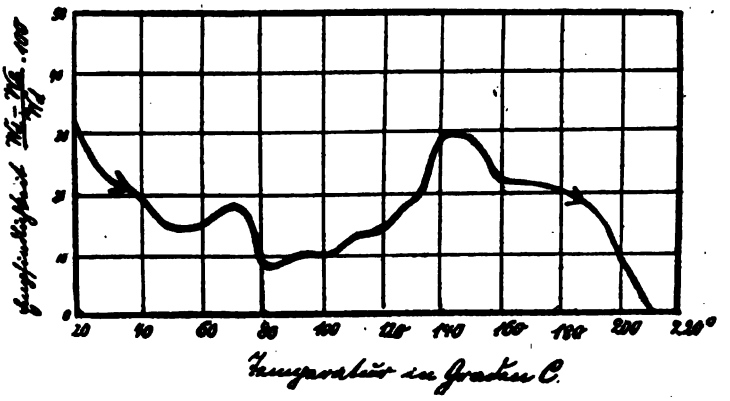


Fig. 63.

Temperaturerhöhung von 20° bis 210°. Zunächst nimmt die Lichtempfindlichkeit bei Temperaturzunahme ab, wie wir es erwarteten. Dann tritt in der Gegend von 60° eine kleine Unregelmäßigkeit auf. Ich erinnere daran, daß amorphes Selen beim Erwärmen in dieser Gegend weich wird (S. 21) und daß vielleicht hierin die Ursache der Unregelmäßigkeit liegt. Zwischen 80 und 100° ist die Empfindlichkeit am geringsten und dann tritt ein rasches Ansteigen ein. Offenbar findet hier eine Feuchtigkeitsabgabe und eine molekulare Umwandlung statt, durch welche die Lichtempfindlichkeit vergrößert wird. Schließlich muß bei weiterer Temperaturerhöhung die Empfindlichkeit wieder abnehmen.

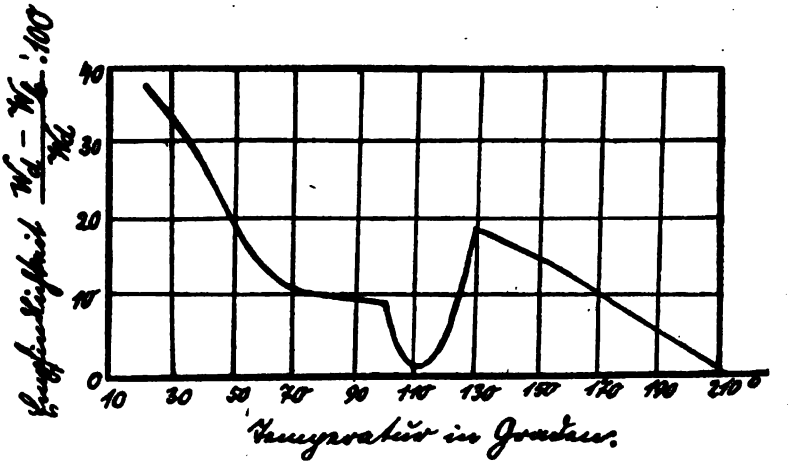


Fig. 64.

Ein ganz ähnliches Verhalten zeigte ein Präparat, das durch längeres Stehen in Chinolin (S. 14) kristallinisch gemacht worden war. Die Empfindlichkeit sank mit zunehmender Temperatur stetig (Fig. 64), war bei 110° sehr gering und stieg von da ab bis 130°, um nachher wieder abzunehmen. Offenbar findet bei 100—110° eine Feuchtigkeitsabgabe und nachher eine innere Umwandlung des Selens in eine empfindlichere Form statt.

Schließlich sei hier noch ein Versuch von Schrott (258) mit verschiedenfarbigem Licht angeführt. Ein Präparat, das aus geschmolzenem Selen dadurch gewonnen worden war, daß man die Selenmasse unter beständigem Streichen mit einem Glasstab erkalten ließ, wurde von 10 auf 210° erwärmt und die Empfindlichkeit a) für weißes, b) für rotes, c) für grünes Licht bei verschiedenen Temperaturen festgestellt. Die Kurven W, R und G in Fig. 65 veranschaulichen die ent-

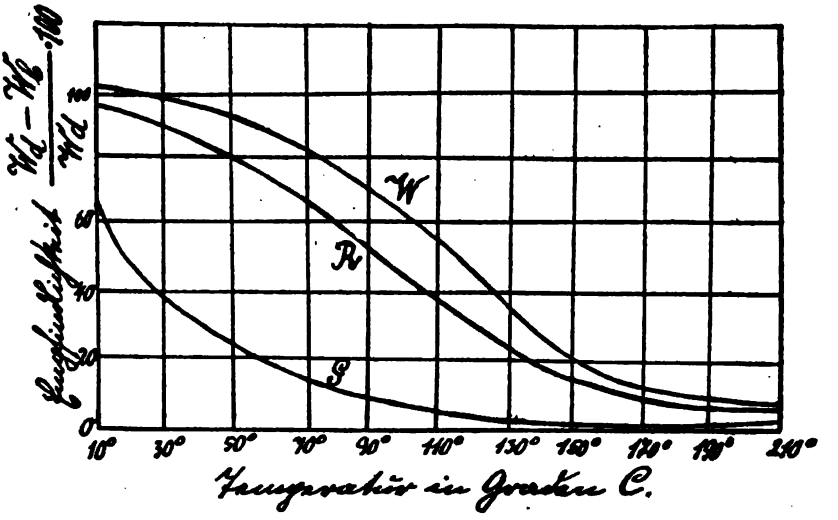


Fig 65.

sprechenden Änderungen der Lichtempfindlichkeit bei steigenden Temperaturen. Während bei weißem und rotem Licht die Empfindlichkeitsabnahme einen annähernd gleichen Verlauf zeigt, sinkt bei Bestrahlung mit grünem Lichte die Empfindlichkeit mit Temperaturzunahme sehr rasch. Vergl. hierüber auch den nächsten Abschnitt.

VII. Abhängigkeit der Lichtwirkung von der Stärke und Farbe des Lichtes.

Da die Empfindlichkeit des Selens für die einfachen Lichtfarben mit der Lichtintensität sich ändert, kann die Frage nach der Abhängigkeit des Effektes von der Lichtstärke nur schwer von der Frage nach dem Einflusse der Wellenlänge des Lichtes getrennt werden. Ein allgemein gültiges Gesetz über den Zusammenhang von Lichtwirkung und Lichtstärke einerseits, von Lichtwirkung und Lichtfarbe andererseits läßt sich nicht aufstellen, da die Selenzellen je nach ihrer Herstellung, der Art und Intensität der Lichtquelle, der Vorbelichtung und Temperatur für Lichteindrücke recht verschiedene Empfindlichkeit besitzen.

Nach Rosse (17), Adams (18), Berndt (202) u. a. ist die Änderung der Leitfähigkeit des Selens bei Belichtung ungefähr der Quadratwurzel aus der Lichtintensität proportional. Es gilt also das Gesetz:

$$\text{I)}\quad D = C \cdot \sqrt{J} = C \cdot J^{1/2}$$

wo D die Leitfähigkeitsänderung, C eine Konstante, J die Lichtstärke bedeutet.

Siemens (21) und Hopius (189) finden, daß die Leitfähigkeit des Selens sich ungefähr proportional mit der Kubikwurzel aus der Lichtstärke ändert, was annähernd durch folgendes Gesetz zum Ausdruck kommt:

$$\text{II)}\quad D = C \cdot \sqrt[3]{J} = C \cdot J^{1/3}$$

Für mittlere Intensitäten ist nach Pfund (404) der Zusammenhang zwischen der Energie J der Lichtquelle und der Leitfähigkeitsänderung bezw. dem Galvanometerausschlag D mit großer Annäherung durch das Gesetz gegeben:

$$\text{III.)}\quad D = C \cdot J^{\beta},$$

wo C und β konstant sind, wenn sich die Wellenlänge des Lichtes nicht ändert. Um β zu erhalten, braucht man nur die den Energien J_1 und J_2 entsprechenden Ausschläge D_1 und D_2 zu verzeichnen. Aus

$$\begin{aligned} D_1 &= C \cdot J_1 \\ D_2 &= C \cdot J_2^{\beta} \end{aligned}$$

$$\text{folgt}\ \beta = \frac{\log D_1 / D_2}{\log J_1 / J_2}$$

β ist mit der Wellenlänge veränderlich. In Fig. 66 stellt die ausgezogene Kurve die verschiedenen Werte von β für einen Wellenlängenbereich von 450—850 μμ dar, die gestrichelte Kurve gibt die Empfindlichkeit der Zelle für die einfachen Lichtfarben gleicher Intensität an.

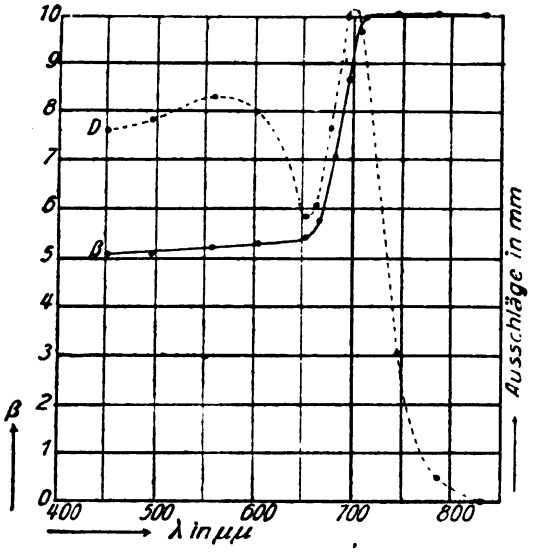


Fig. 66.

Es ergab sich, daß β für die Spektralgebiete vom Violett bis zum Gelb nahezu gleich 1/2 ist. Die von Pfund aufgestellte Beziehung stimmt also für die kürzeren Wellenlängen mit den Ergebnissen von Rosse, Adams und Berndt überein. Dagegen fand Pfund bei Annäherung an das rote Spektralgebiet eine starke Zunahme von β, so daß im tiefen Rot und Ultrarot β den Wert 1 annimmt. Nicholson (424) bestätigt die Richtigkeit dieses Ergebnisses und fand, daß die Beziehung $D' = C \cdot J^{1/2}$ auch für das ultraviolette Gebiet bis zur Wellenlänge 230 μμ gilt. Bei diesen Versuchen war die Selenzelle 12 1/2 Sekunden lang dem Lichte ausgesetzt, bis die Messung vorgenommen wurde. Als die Expositionszeit verringert wurde, zeigte sich eine Zunahme des Wertes von β. Wurde die Belichtung der Zelle aber in jedem einzelnen Falle solange fortgesetzt, bis die Leitfähigkeit einen konstanten Wert angenommen hatte, so erwies sich β annähernd konstant und für das ganze Spektrum gleich 1/2.

Wir haben die Selenzellen bezüglich ihrer Empfindlichkeit früher (S. 73) in 2 Gruppen geteilt, in harte und weiche

Zellen. Erstere sind für schwaches Licht wenig empfindlich, ändern aber bei kräftiger Beleuchtung ihren Widerstand bedeutend; dagegen sind die weichen Zellen für schwache Lichteindrücke sehr empfindlich, werden aber bei kräftiger Belichtung verhältnismäßig wenig beeinflußt. In Fig. 67 veranschaulicht Kurve H die Widerstandsabnahme einer harten Zelle, Kurve W diejenige einer weichen Zelle bei steigender Lichtintensität (Hesehus 81, 188, Ruhmer 173, 177, Presser 288, Korn 378). Für eine weiche Drahtzelle und eine gravierte Zelle erhielt ich (507) die in Fig. 68 dargestellten Leitfähigkeitsänderungen.

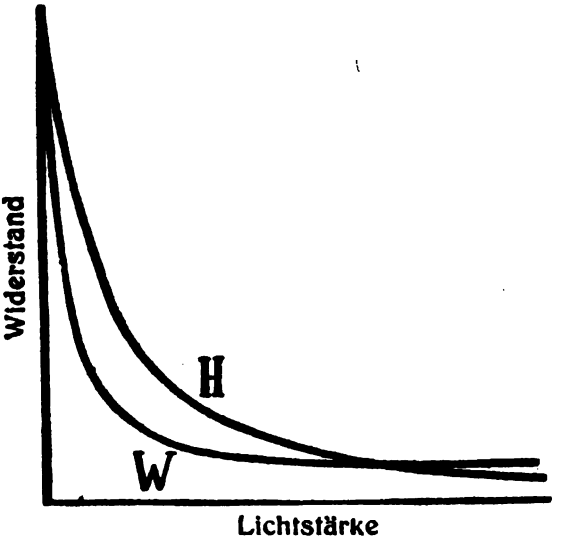


Fig. 67.

Hesehus kam zu dem Gesetz:

$$\text{IV.)}\quad J = a\,(b^m - 1).$$

wo m die Leitfähigkeit und a und b Konstanten sind; letztere haben für weiches Selen ungefähr die Werte a = 5, b = 2.

Ruhmer stellt folgende Relation auf:

$$\text{V.)}\quad \frac{W_a}{W_b} = \left(\frac{b}{a}\right)^{\alpha}$$

wo a die schwächere, b die stärkere Beleuchtung, W_a und W_b die zugehörigen Widerstände bedeuten. Der Beleuchtungsexponent α liegt zwischen 0,25 und 0,35.

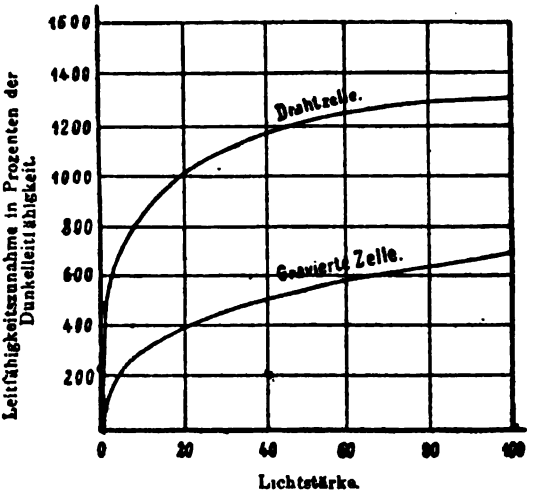


Fig. 68.

Nach Presser gilt die Beziehung:

$$\text{VI.)}\quad W = \frac{K}{(J + b)^x}$$

und zwar bezeichnet W den Selenwiderstand, J die Lichtstärke, K und b je eine Konstante und x ein Maß für die Weichheit der Zelle; letztere Größe lag in allen Fällen zwischen 1 und 1,5 und zwar um so näher bei 1, je härter die Zelle war.

Athanasiadis (299) fand folgendes Gesetz:

$$\text{VII.)}\quad J = k\,b\,(k - a),$$

wo J die Lichtstärke, k die Leitfähigkeit und a und b Konstanten sind; für letztere wurden in einem Falle die Werte a = 6,47, b = 0,087 gefunden, die Größe k = $(1/W) \cdot 10^5$. Aus den 2 Kurven in Fig. 69 ersehen wir die Widerstandsänderungen,

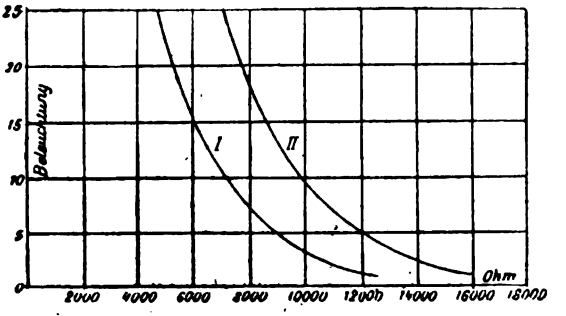


Fig. 69.

wie sie Athanasiadis für verschiedene Lichtstärken gefunden. Die Widerstände sind hier auf der Abszisse, die Lichtstärken auf der Ordinate aufgetragen. Fig. 70 veranschaulicht in gleicher Weise die Lichtwirkung des weißen, roten und blauen Lichtes einer Glühlampe.

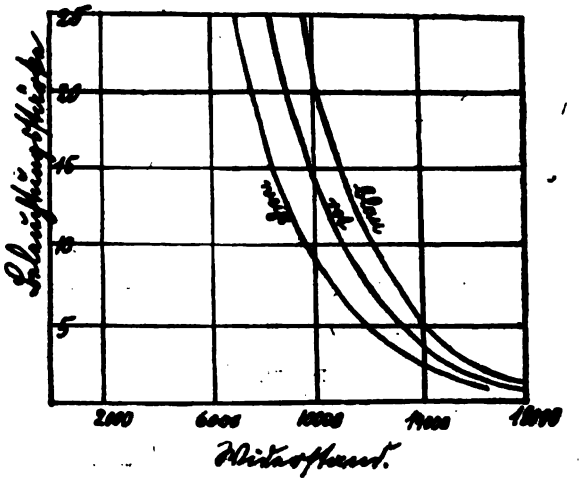


Fig. 70.

Die vorstehenden Gesetze wurden in der Weise gewonnen, daß zwischen den einzelnen Messungen längere Pausen gemacht wurden, damit sich die Zellen wieder erholen konnten. Solchen Gesetzen kann natürlich keine allgemeine Gültigkeit zukommen, da sie auf die hysteretischen Einflüsse, die Lichtnachwirkungen, keinerlei Rücksicht nehmen, während doch in Wirklichkeit der Übergang von einer Lichtintensität zur anderen sich meist sehr rasch vollzieht. Sperling (292) hat für die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Lichtstärke bei direktem Übergang von einer Lichtstärke zur andern folgendes Gesetz aufgestellt:

$$\text{VII.)}\quad D = a \cdot \ln (1 + bJ),$$

wo a und b Konstanten sind, die von der Farbe und Lichtintensität J abhängen. Die Beziehung zwischen Lichtstärke und Leitfähigkeit für eine dünne Selenschicht gibt Sperling durch die in Fig. 71 gezeichnete Kurve wieder; für dicke Schichten erfolgt die Änderung nach einer Exponentialkurve.

Steigert man die Beleuchtungsstärke von Null bis zu einem Höchstwerte und verringert sie dann wieder bis auf Null, so fällt die aufsteigende Kurve der Leitfähigkeiten im allgemeinen nie mit der abfallenden zusammen. Bei derartigen Versuchen

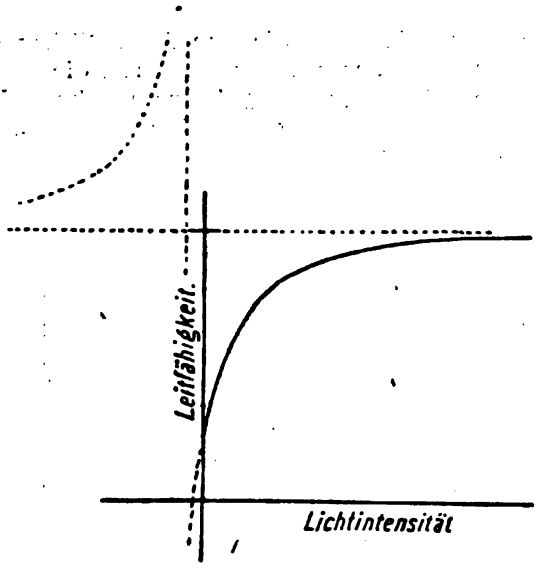


Fig. 71.

verschiebt man die Lichtquelle senkrecht zur Selenzelle und bestimmt in verschiedenen Stellungen die Leitfähigkeit und zwar entweder immer nach gleichen Belichtungszeiten oder nach Erreichung der maximalen Leitfähigkeit. Je nach der Art der Zelle und der Dauer der Belichtung sind die Vorgänge verschieden. Benützt man eine harte Zelle, die erst nach Stunden langer Belichtung das Maximum der Leitfähigkeit erreicht, so erhält man bei kurz dauernder Belichtungszeit offenbar ein anderes Resultat als bei Verwendung einer weichen Zelle, die starke Ermüdung zeigt. Im ersten Falle muß der aufsteigende Ast tiefer liegen als der abfallende, weil mit der Dauer der Belichtung der Effekt immer mehr anwächst. Im letzteren Fall aber liegt der abfallende Ast tiefer als der ansteigende, da die Ermüdung sich immer mehr geltend macht und den Effekt herabdrückt. Im übrigen müssen sich die beiden Äste um so mehr nähern, je länger die Belichtungszeit ist, weil dann die allmählichen Änderungen weniger ins Gewicht fallen.

Die Kurven in den Figuren 72 bis 74 zeigen uns die Versuchsergebnisse von Carpini (223). Bei dem ersten Versuch (Fig. 72) wurde die Zelle in jeder Stellung 3 Minuten, bei dem zweiten (Fig. 73) je 5 Minuten, bei dem dritten (Fig. 74) je 20 Minuten belichtet. Man sieht, daß die beiden Äste mit wachsender Belichtungsdauer sich immer mehr nähern. Das verwendete Selenpräparat gehörte zur Gruppe der harten Zellen.

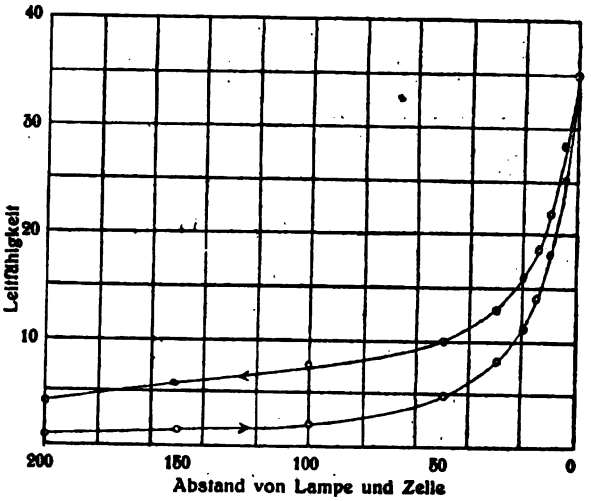


Fig. 72.

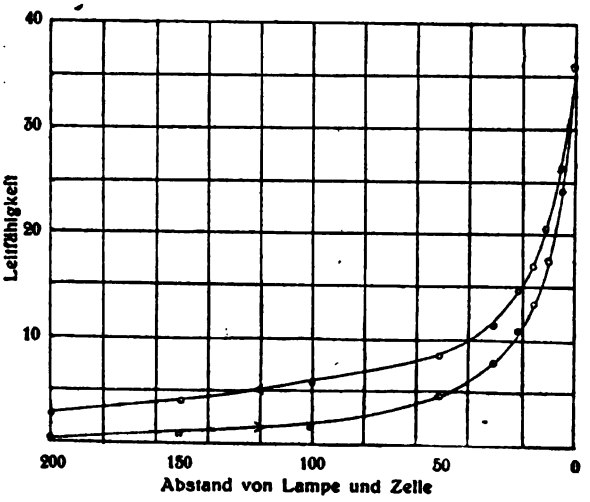


Fig. 73.

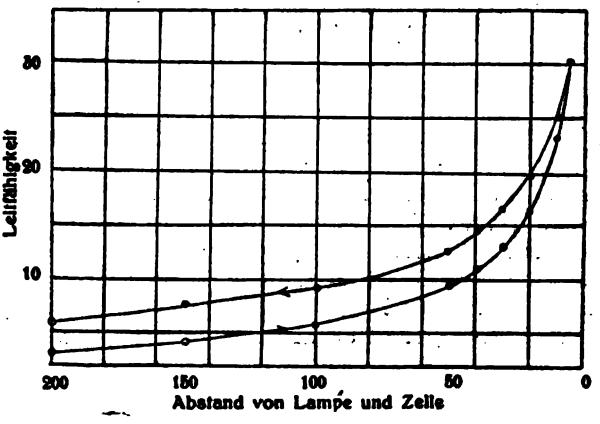


Fig. 74.

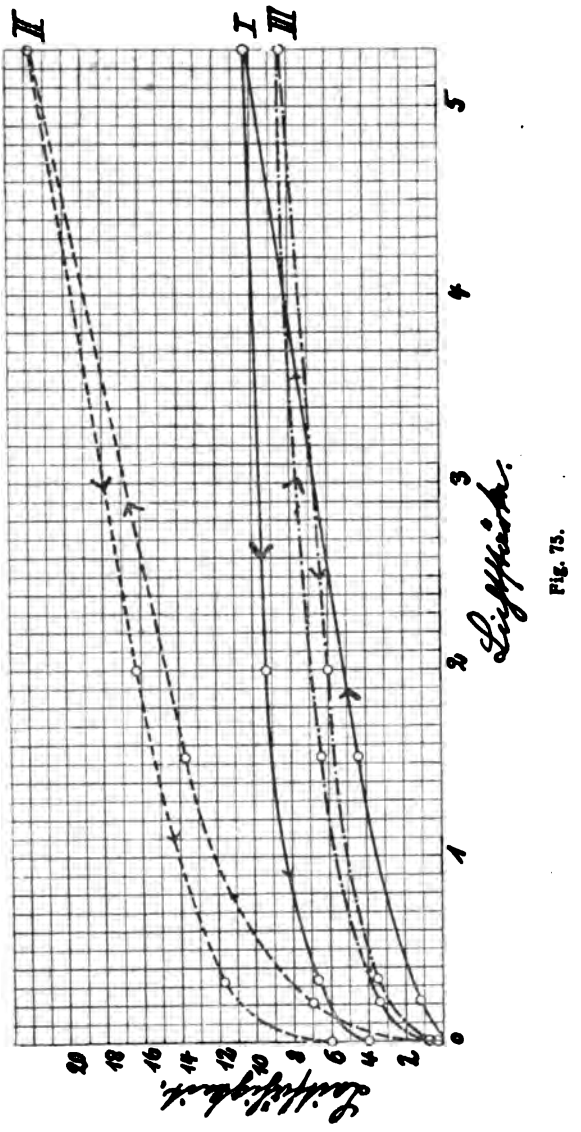


Fig. 75.

Fig. 75 veranschaulicht die Resultate von drei Versuchen, die Sperling (292) an einer weichen Zelle, welche die Ermüdung zeigte, angestellt hat. Kurve I bezieht sich auf rasche, II auf mittlere, III auf langsame Änderung der Lichtintensität. Die ganze Versuchsdauer betrug im ersten Falle 39, im zweiten 180, im dritten 830 Sekunden. Bei kurzer Belichtungsdauer lag der abfallende Ast höher als der aufsteigende (Kurve I), bei langer Belichtungszeit ergab sich das entgegengesetzte Re-

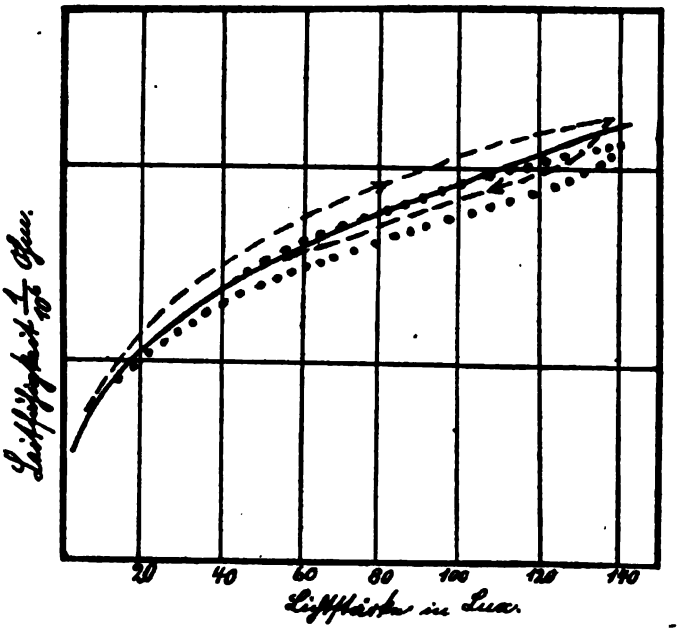


Fig. 76.

sultat (Kurve III). Die Versuche wurden mit einfachem Licht und zwar mit blauem ausgeführt.

Fig. 76 zeigt die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Lichtstärke, wie sie Jaenichen (441) für weißes Licht gefunden hat. Auf der Abszisse ist die Lichtstärke in Lux, auf der Ordinate die Leitfähigkeit aufgetragen. Jede Zelle wurde zweimal in der Weise geeicht, daß jedesmal die Beleuchtungsstärke von Null bis zu einem Höchstwerte gesteigert und dann wieder bis auf Null vermindert wurde. Die stark ausgezogene Kurve zeigt den Mittelwert aus allen 4 Ablesungen, während die gestrichelte und die punktierte Kurve die Einzelwerte veranschaulichen. Bei der Rückkehr vom Höchstwert lagen die Leitfähigkeitswerte stets tiefer als bei dem Aufstieg, was auf die Ermüdung zurückzuführen ist. Die Ablesungen erfolgten in allen Fällen erst nach 40—60 Sekunden langer Belichtung, nachdem die Leitfähigkeit bezw. der Galvanometerausschlag einen annähernd konstanten Wert angenommen hatte.

An einer harten Zelle, die ich (505) je 4 Minuten lang mit Licht von verschiedener Intensität bestrahlte, beobachtete ich eine auffallende Regelmäßigkeit. Die Stärke des Lichtes verhielt sich bei den 3 Versuchen, die an drei verschiedenen

Tagen angestellt wurden, wie 1:2:4. In Fig. 77 ist der zeitliche Verlauf der Erscheinung graphisch dargestellt; auf der Abszisse ist die Zeit in Minuten, auf der Ordinate die Leitfähigkeitserhöhung, ausgedrückt in Prozenten des Dunkelwertes, aufgetragen. Es zeigt sich, daß für gleiche Leitfähigkeitszunahme bei den verschiedenen Lichtstärken das Produkt aus Lichtstärke und Belichtungszeit konstant war; so betrug z. B. für eine Leitfähigkeitszunahme von ca. 160 % dieses Produkt 4, während es für ca. 135 % ungefähr gleich 2 war. Es konnte also an dieser Zelle ein bestimmter Effekt auch mit x mal so schwacher Lichtintensität erzielt werden, wenn man nur die Belichtungszeit dafür x mal so groß machte. Dieses Gesetz dürfte indes nur innerhalb gewisser Grenzen für Zellen bestimmter Art Gültigkeit haben.

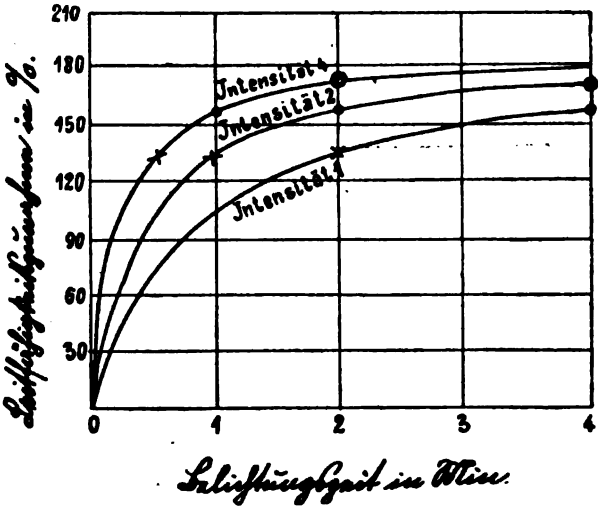


Fig. 77.

Wir wollen nunmehr die Farbenempfindlichkeit des Selens d. h. die Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Farbe des Lichtes eingehender behandeln. Viele Forscher haben die einfachen Farben des Spektrums vom ultravioletten bis zum ultraroten Ende und umgekehrt der Reihe nach auf eine Selenzelle einwirken lassen und sogenannte Empfindlichkeitskurven, Wellenlängenempfindlichkeitskurven, gezeichnet. Auffallender Weise weichen die Angaben der Forscher weit von einander ab und es existiert kaum ein Wellenlängenbereich, in dem nicht ein Maximum der Empfindlichkeit gefunden worden wäre. In den meisten Fällen kam den roten Strahlen die größte Wirkung zu. Da die älteren Forscher gewöhnlich irgend eine Lichtquelle in ihre spektralen Farben

zerlegten und diese der Reihe nach auf eine beliebige Zelle einwirken ließen, beziehen sich ihre Angaben nicht auf Lichtfarben gleicher Energie, so daß die gefundenen Resultate nicht mit einander verglichen werden können. Dagegen sind in neuerer Zeit seit Pfund (215) und Sperling (292) von mehreren Seiten sehr exakte Messungen mit einfachen Lichtstrahlen gleicher Energie gemacht worden. Erst die neueren Versuche, insbesondere die wertvollen Arbeiten von F. C. Brown über die Selenkristalle, haben mit Sicherheit erwiesen, daß die Farbenempfindlichkeit des Selens je nach der Kristallisation, der Lichtstärke, der Belichtungsdauer, der Vorbelichtung und Temperatur sehr verschieden sein kann. Eine Selenzelle enthält im allgemeinen mehrere Kristallformen von verschiedener Farbenempfindlichkeit. Das graue kristallinische Selen selbst hat keine charakteristische Kurve der Farbenempfindlichkeit, in einer Selenzelle kommen vielmehr alle vorhandenen Kristallformen mit ihrer verschiedenen Farbenempfindlichkeit zur Wirkung. Da die Kristallform von der Höhe der Kristallisationstemperatur abhängt, muß die Art des Erhitzungsprozesses von großem Einfluß auf die Farbenempfindlichkeit sein. Außerdem hat sich gezeigt, daß die charakteristische Kurve einer einzelnen Selenzelle unter verschiedenen Versuchsbedingungen Änderungen erfährt; besonderen Einfluß zeigten die Lichtstärke, die Belichtungsdauer, die Vorbelichtung und die Temperatur. Beimengungen zum Selen vermögen die Lichtempfindlichkeit herabzusetzen, haben aber keinen Einfluß auf die Lage der Empfindlichkeitsmaxima. Die Farbenempfindlichkeit ist also unabhängig von Metallzusätzen zum Selen (Pfund 215, Brown 433, Abonnenc 431).

Da eine Zelle bei andauernder Belichtung keine konstante Leitfähigkeit besitzt, wurde der Effekt von den einzelnen Forschern immer nach gleichen Belichtungszeiten oder nach Eintritt der maximalen Leitfähigkeit gemessen. Lichtstrahlen gleicher Energie wurden gewöhnlich mit Hilfe eines Radiomikrometers, Bolometers oder Thermoelements gewonnen. Aus den neueren Versuchsergebnissen hat sich das für die Elektrotechnik besonders wichtige Resultat ergeben, daß die Farbenempfindlichkeit des Selens zum Teil in der Hand des Konstrukteurs liegt.

Pfund (215, 336) fand an seinen Selenzellen ein ausgesprochenes Empfindlichkeitsmaximum für rotes Licht von der Wellenlänge 700 μμ; die Empfindlichkeit wächst, wie die Kurve „Leitfähigkeit" in Fig. 78 zeigt, von 1000 μμ langsam und von 800 μμ sehr rasch gegen 700 μμ, um gegen 600 μμ schnell abzufallen; mit noch kleinerer Wellenlänge bleibt

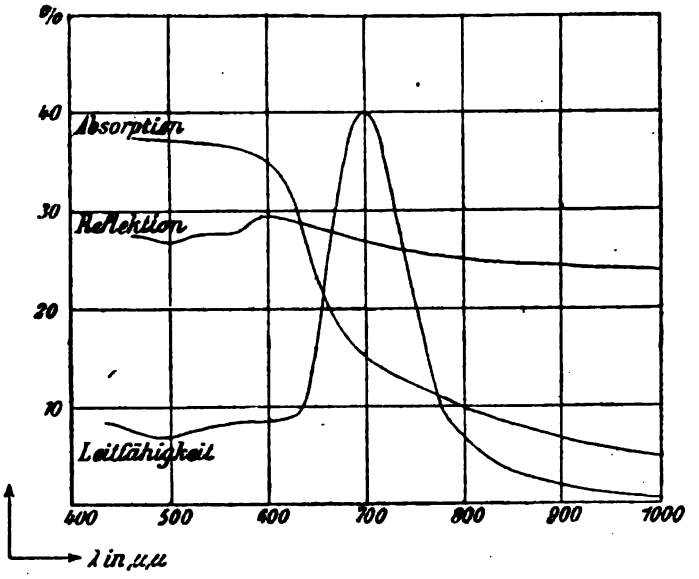


Fig. 78.

die Empfindlichkeit nahezu konstant. Zur Herstellung homogener Lichtstrahlen gleicher Intensität konzentrierte Pfund jedes homogene Strahlenbündel auf die berußte Lötstelle eines Radiomikrometers nach Boys und verringerte die Energie auf einen solchen Betrag, daß sie stets den gleichen Ausschlag des Mikrometers hervorbrachte. Die Ablesung erfolgte immer dann, wenn der Galvanometerausschlag ein Maximum erreicht hatte, was 2—3 Minuten in Anspruch nahm.

Die beiden anderen in Fig. 78 gezeichneten Kurven geben die Reflexion und Absorption des Selens an, gemessen an sehr dünnen Schichten von $4{,}5 \cdot 10^{-5}$ mm Stärke. Da die Absorption vom roten bis zum violetten Teile des Spektrums beständig ansteigt, reichen die optischen Eigenschaften des Selens die Erklärung des Empfindlichkeitsmaximums nicht aus. Nach dem Verlauf der Absorptionskurve sollte das Maximum der Lichtempfindlichkeit im Violett oder nach den Untersuchungen von Cornu (100) im Ultraviolett liegen. Pfund erklärt das Auftreten des Empfindlichkeitsmaximums für die dünnen Schichten, die für die Leitfähigkeitsänderungen im Lichte und die Absorption in Betracht kommen, durch die Tatsache, daß der spezifische Widerstand metallischer Schichten bis zu einer Schichtdicke von der Größenordnung 10^{-5} mm konstant bleibt, mit abnehmender Schichtdicke aber sehr rasch wächst. Dieser Fall ist auf das belichtete Selen unmittelbar anwendbar, weil der erhöhte Strom lediglich in der sehr dünnen Oberflächenschicht geführt wird. Da bei einer

Wellenlänge von 700 μμ die Eindringungstiefe des Lichtes und somit die Dicke der stromführenden Schicht gerade gleich der „kritischen" Schichtdicke und bei kleinerer Wellenlänge kleiner als diese ist, so muß in diesem Gebiete eine gewaltige Leitfähigkeitsabnahme auftreten, welche die von der Absorption herrührenden Wirkungen aufhebt. Wenn nun die Wellenlänge, bei der das Empfindlichkeitsmaximum auftritt, von der Eindringungstiefe abhängt, so muß mit Zunahme der Lichtintensität und somit der Eindringungstiefe die Lage des Maximums nach der Seite der kürzeren Wellen hin verschoben werden. Um diese Anschauung auf ihre Richtigkeit zu prüfen, nahm Pfund die Empfindlichkeitskurve an einem Selenpräparat a) bei starker, b) bei schwächerer Belichtung auf. Fig. 79

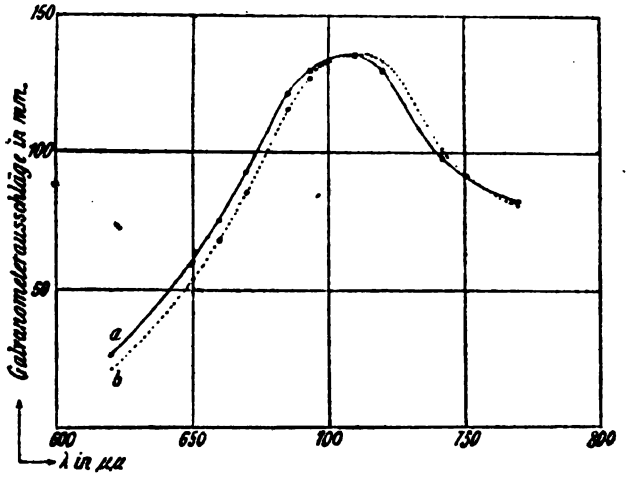


Fig. 79.

veranschaulicht die Ergebnisse dieser Versuche. Die ausgezogene Kurve a stellt die Empfindlichkeitskurve für intensive Beleuchtung (gezeichnet in kleinerem Maßstab), Kurve b diejenige für schwächeres Licht dar. Die Lage des Maximums scheint tatsächlich bei der stärkeren Beleuchtung eine kleine Verschiebung nach der Seite der kürzeren Wellenlängen erfahren zu haben. Überzeugend wirkt das Versuchsresultat freilich nicht, denn die Verschiebung ist nur unbedeutend; genauen Aufschluß würde eine Untersuchung an einer Selenschicht bringen, die noch dünner ist als die kritische Schichtdicke, da an ihr das Empfindlichkeitsmaximum im Rot ganz fehlen müßte.

Aus späteren Versuchen von Pfund (404) mit der gleichen Zellenart und verschiedener Lichtintensität ergab sich, daß bei geringer Lichtstärke das Empfindlichkeitsmaximum im Rot tatsächlich verschwindet (Kurve I in Fig. 80) und an seine Stelle ein schwaches Maximum im Grüngelb tritt. Mit zunehmender Beleuchtung aber wird das Maximum im Rot immer ausgeprägter, ohne seine Lage im geringsten zu ändern. Es wurden 4 Versuche unternommen, bei denen die Lichtstärken sich wie 1:4:9:16 verhielten (Kurven I bis IV in Fig. 80); die Belichtung dauerte bei jeder Messung 12,5 Sekunden. Bei zunehmender Lichtstärke wächst das Maximum im Grüngelb viel weniger als das im Rot; eine Verschiebung der Lage des roten Maximums nach kürzeren Wellenlängen bei zunehmender Lichtstärke ist nirgends zu beobachten.

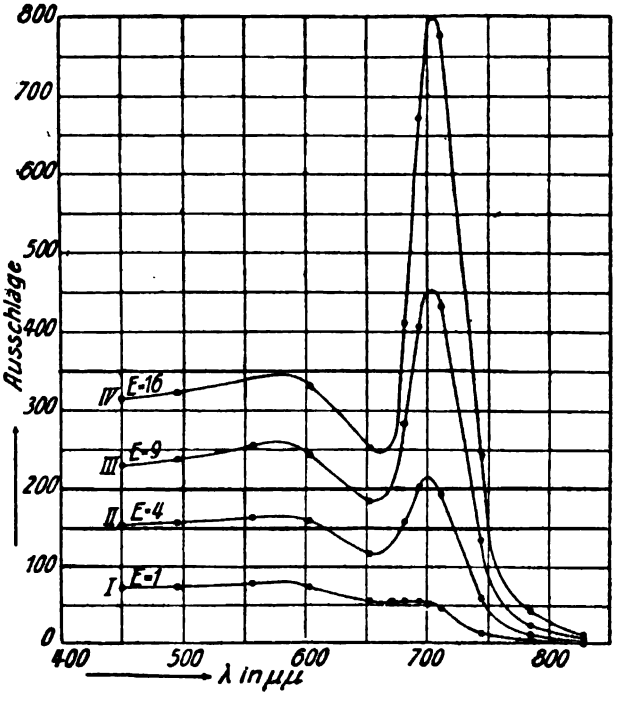


Fig. 80.

Nach Sperling (292) besitzen allgemein die blauen Strahlen die größte Lichtwirkung. Auf Grund theoretischer Betrachtungen kommt Sperling zu dem Schlusse, daß Präparate mit überwiegend unmetallischem Selen besonders stark von den blauen Strahlen beeinflußt werden, während metal-

lische Präparate mehr auf rotes Licht reagieren. Dann müßte aber die Höhe der Kristallisationstemperatur auf die Farbenempfindlichkeit von ganz besonderem Einflusse sein, ein Ergebnis, das später von mehreren Forschern bestätigt wurde. Aus den Forderungen Sperlings ergäbe sich, daß bei Erhitzungstemperaturen von mehr als 200° eine Selenart entsteht, die besonders auf rotes Licht reagiert, während das bei tieferen Temperaturen auskristallisierte Selen sein Empfindlichkeitsmaximum im brechbareren (blauen) Teil des Spektrums hätte. Dieses Ergebnis stimmt mit den Beobachtungen von Brown (S. 124) an Selenkristallen überein, widerspricht aber den experimentellen Forschungsresultaten von Dietrich (S. 116) an Selenzellen.

Pochetino (382) erhielt den Höchstwert der Empfindlichkeit bei einer etwas kleineren Wellenlänge als Pfund, etwa bei 680 μμ; außerdem beobachtete er Nebenmaxima in dem Wellenlängenbereich von 460—530 μμ. Während die Höchstwerte für rotes Licht stets an der gleichen Stelle auftraten, war die Lage der Nebenmaxima etwa um 70 μμ verschieden (Fig. 81).

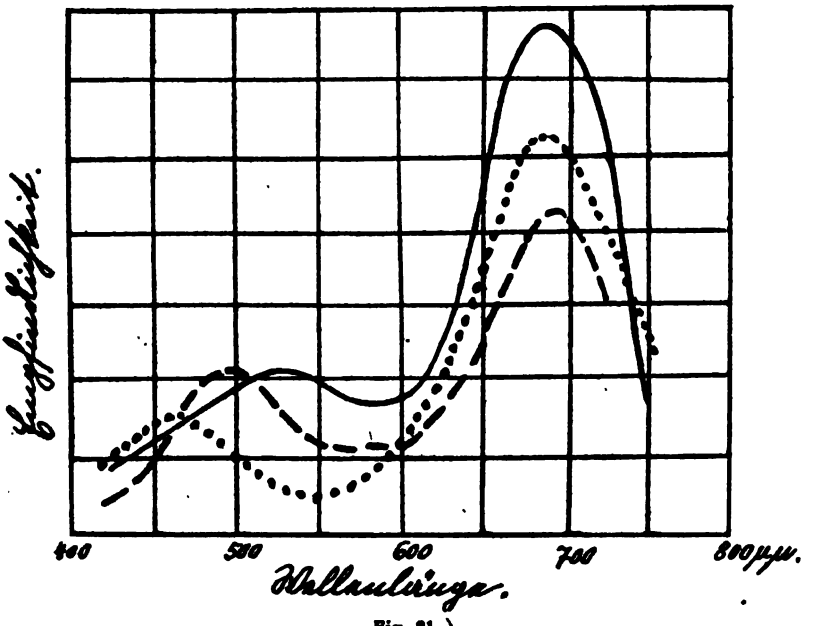


Fig. 81.

Nicholson (424) untersuchte die Farbenempfindlichkeit der Selenzelle für einfache Lichtfarben gleicher Intensität vom Ultrarot bis Ultraviolett. Die Energie wurde mittels eines

hochempfindlichen Thermoelementes festgestellt; die Messung der Leitfähigkeit erfolgte in jedem Falle erst nach 12½ Sekunden langer Belichtungsdauer. Die Ergebnisse der Beobachtungen sind in Fig. 82 graphisch dargestellt, wo auf der Ordinatenachse die Leitfähigkeiten, auf der Abszissenachse die Wellenlängen aufgetragen sind. Bei 700 μμ zeigt sich das (rote) Maximum, in der Nähe von 600 μμ ein Minimum; die Ultraviolettempfindlichkeit ist bis 230 μμ recht beträchtlich.

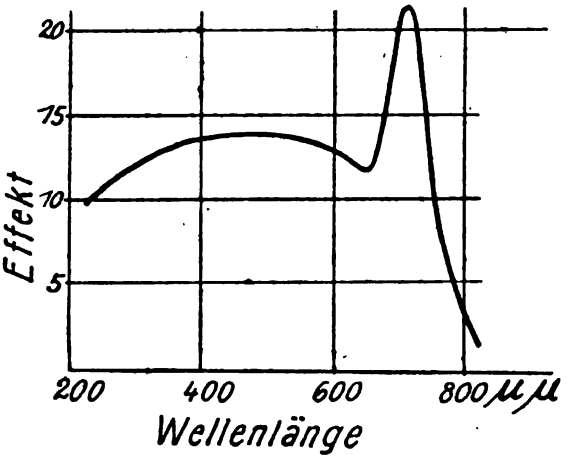


Fig. 82.

Vorbelichtung ist von großem Einfluß auf die Farbenempfindlichkeit des Selens (Marc 192). Nach Marc und Pochettino (382) steigert Vorbelichtung mit weißem oder blauem Licht die Empfindlichkeit für rotes Licht, während rotes Licht keinen Einfluß auf die Empfindlichkeit für blaue Strahlen ausübt. Das Selen verhält sich also in diesem Punkte ähnlich wie das Jodsilber.

Nicholson (424) nahm auf Veranlassung von Pfund Empfindlichkeitskurven für verschiedenfarbiges Licht auf an Zellen, die gleichzeitig dauernder Bestrahlung mit einfachem Lichte ausgesetzt waren. Die Ergebnisse der Versuche werden durch die Kurven in Fig. 83 veranschaulicht. Kurve 1 zeigt die gewöhnliche Empfindlichkeitskurve, wie sie ohne gleichzeitige dauernde Bestrahlung für Strahlen verschiedener Wellenlänge und gleicher Intensität gefunden wurde. Bei dem durch Kurve 2 dargestellten Versuch wurde die Zelle dauernd ultraroter Bestrahlung ausgesetzt, wodurch ihre Leitfähigkeit um das 2½fache stieg, und die gleichzeitige Wirkung einfacher Lichtfarben gleicher Intensität auf die Zelle festgestellt. Der Einfluß der dauernd ultraroten

Bestrahlung ist ganz beträchtlich. Während die Empfindlichkeit für Violett bis Orange nur etwas vermindert wurde, fehlt das Maximum im Rot fast vollständig und die Zelle ist bei etwa 750 μμ praktisch unempfindlich. Die Trägheit der Zelle wurde sehr merklich herabgesetzt. Ein ganz ähnliches Verhalten zeigte die Zelle, wenn sie dauernd roter Belichtung ausgesetzt war.

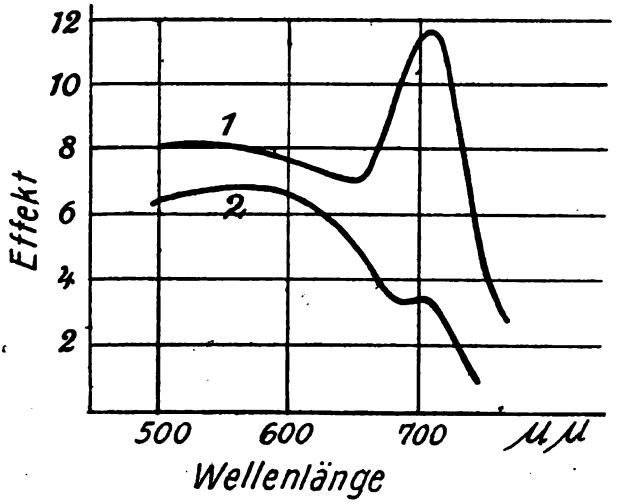


Fig. 83.

Wesentlich anders verhielt sich die Zelle, wenn sie dauernder grüner Belichtung ausgesetzt wurde, wodurch ihre Leitfähigkeit auf das dreifache stieg. Kurve 1 in Fig. 84 stellt wieder die gewöhnliche Empfindlichkeitskurve dar, während Kurve 2 die Leitfähigkeitsänderungen für die verschiedenen Wellenlängen bei gleichzeitiger grüner Belichtung veranschaulicht. Die Empfindlichkeit für die kurzwelligen Strahlen jenseits des roten Maximums war fast gleich Null, während sie für Rot und Ultrarot nur eine geringe Abnahme zeigte. Die Trägheit war sehr ausgeprägt.

Aus den Versuchen ergibt sich, daß eine Bestrahlung mit einfachem Lichte die Empfindlichkeit der Selenzelle gegen eben diese Lichtfarbe beträchtlich herabsetzt.

Nicholson (424) untersuchte ferner die Empfindlichkeit des Selens für einfarbiges Licht gleicher Energie bei verschieden großer Expositionsdauer. Die Versuchsergebnisse sind in Fig. 85 graphisch dargestellt; die eine Kurve gibt die Empfindlichkeit bei 15 Sekunden langer Belichtung an, während bei dem anderen Versuch die Belichtung solange fort-

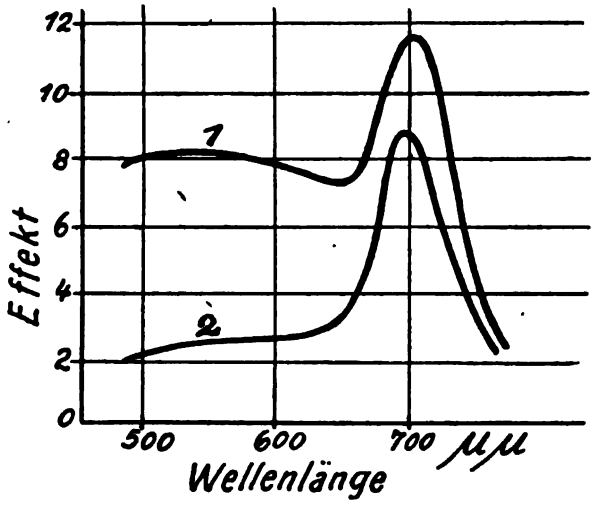


Fig. 84.

gesetzt wurde, bis die Leitfähigkeit einen konstanten Wert annahm; dies beanspruchte natürlich je nach der Wellenlänge verschieden lange Zeiten. Am Schlusse der Belichtung wurde dann immer die Messung der Leitfähigkeit vorgenommen. Die Figur zeigt deutlich die Zunahme der Trägheit mit der

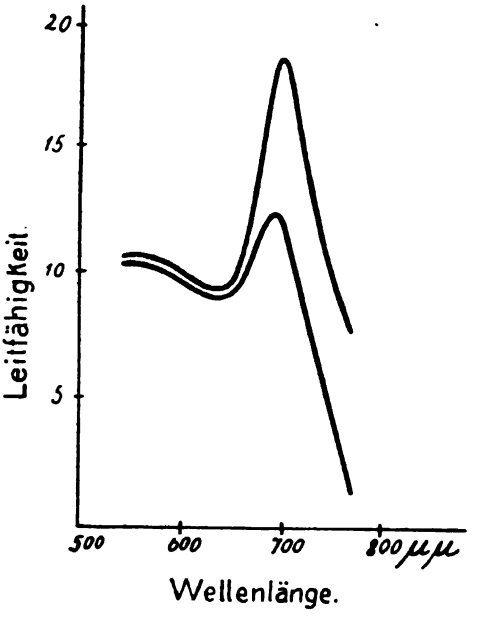


Fig. 85.

Wellenlänge. Während die beiden Kurven bis in die Nähe des roten Spektralgebietes parallel laufen, weichen sie im roten und ultraroten wesentlich von einander ab.

Nach Brown und Sieg (433) hat das Selen als solches keine charakteristische Kurve der Farbenempfindlichkeit; vielmehr muß das Vorhandensein von 2 oder 3 lichtempfindlichen Formen im Selen angenommen werden. Die wesentlichen Faktoren für die Verschiedenheit der Kurven sind jedenfalls verschiedene Kristallformen. Jede Kristallform aber hat eine bestimmte charakteristische Kurve. In einer Selenzelle werden also alle vorhandenen Kristallformen, jede mit ihrer verschiedenen Farbenempfindlichkeit, zur Wirkung kommen. Die charakteristische Lichtempfindlichkeitskurve einer einzelnen Zelle ist zweifellos durch ihre Herstellung bedingt.

Bei Anwendung verschiedener Spannungen ergab sich kaum eine Änderung in der Form der Kurve. Daß die spektrale Reihenfolge der Bestrahlung nicht von Einfluß auf die Form der Empfindlichkeitskurve, erkennt man aus Fig. 86. Kurve I wurde dadurch erhalten, daß bei der Messung der Empfindlichkeit mit der kürzesten Wellenlänge begonnen und dann zu immer größeren Wellenlängen übergegangen wurde; bei Kurve II war das Verfahren umgekehrt. Das Empfindlichkeitsmaximum lag in beiden Fällen an der gleichen Stelle bei ca. 730 μμ. Die verwendete Zelle war von Ruhmer.

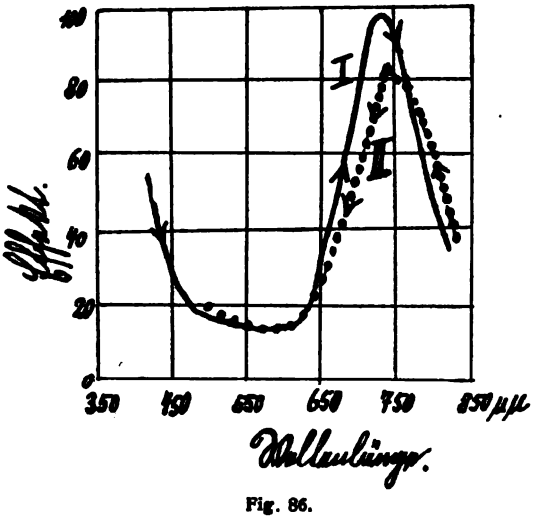


Fig. 86.

Einen gleichen Versuch unternahm Elliot (462) an einer Zelle, die ein Maximum in der Gegend von 630 μμ hatte, indem er zuerst von kürzeren zu längeren Wellenlängen (Kurve I in

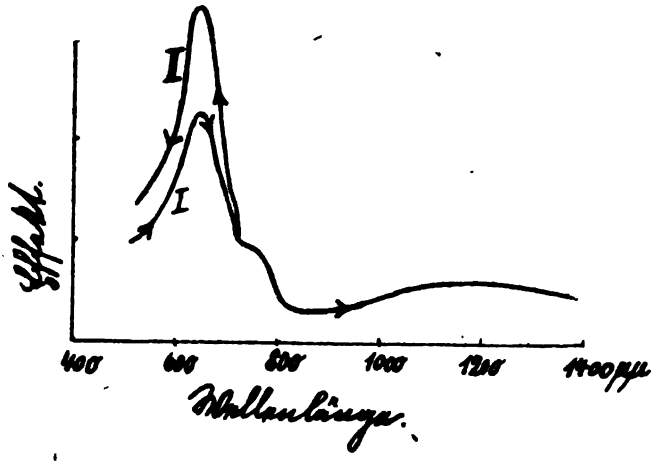


Fig. 87.

Fig. 87) überging und dann umgekehrt (Kurve II) verfuhr. Auch hier erwies sich die Reihenfolge der Bestrahlung ohne Einfluß auf die Lage des Empfindlichkeitsmaximums.

Pfund fand ein Maximum der Empfindlichkeit in der Gegend von 700 μμ, das bei geringer Lichtstärke verschwand (S. 108). Ebenso erhielten Brown und Sieg (416) bei großer

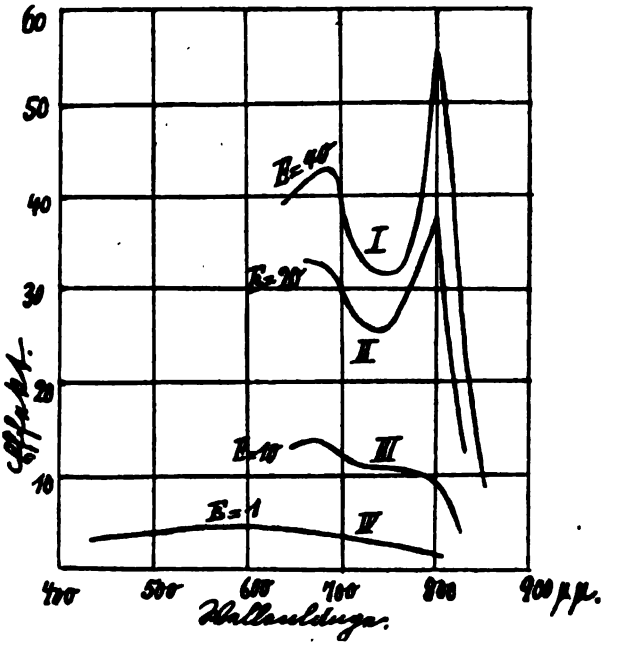


Fig. 88.

Lichtintensität ein ausgesprochenes Maximum für 800 μμ, von dem bei kleiner Lichtintensität nicht eine Spur zu beobachten war. Fig. 88 zeigt 4 Kurven, die bei verschiedener Lichtstärke gewonnen wurden. Während die Kurven I und II neben einem kleineren Maximum in der Gegend von 700 μμ ein ausgesprochenes Empfindlichkeitsmaximum bei 800 μμ haben, ist bei III und IV die Empfindlichkeit für kürzere Wellen größer als in der Gegend von 800 μμ.

Eine auffallende Erscheinung zeigte sich bei diesen Versuchen, als die Belichtungsdauer außerordentlich verkürzt wurde. So blieb bei einer Belichtungszeit von nur 0,4 Sek. die Empfindlichkeit innerhalb des Wellenlängenbereiches von 460 bis 790 μμ (Kurve I Fig. 89) fast vollständig konstant. Es war also die Änderung des Selenwiderstandes innerhalb dieser Grenzen unabhängig von der Wellenlänge. Dagegen wurde für eine Belichtungsdauer von 30 Sekunden die Kurve II, bei 60 Sekunden die Kurve III erhalten.

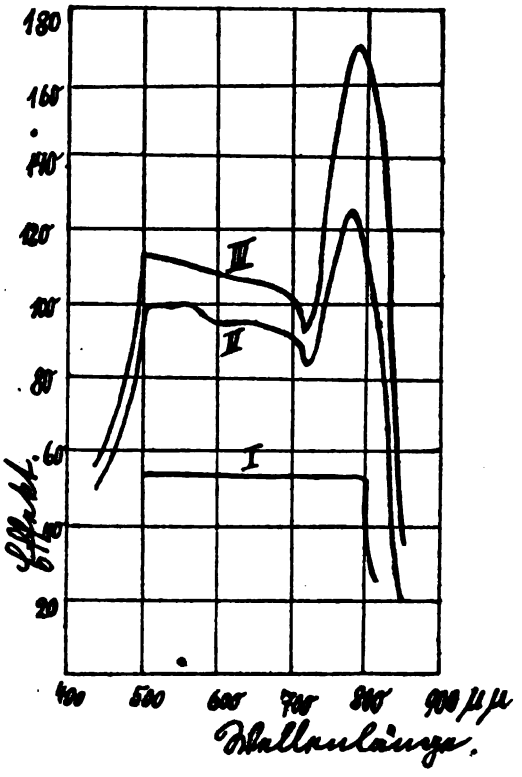


Fig. 89.

Dietrich (436, 478) hat durch umfangreiche Versuche festgestellt, daß die Höhe der Erhitzungstemperatur, die Dauer der Erhitzung und die Art der Abkühlung bei dem Kristallisationsprozeß von ganz besonderem Einfluß auf die Farbenempfindlichkeit des Selens ist. Es sollen seine Resultate wegen ihrer großen Bedeutung hier eingehender wiedergegeben werden.

Die Kurven in Fig. 90 zeigen die Farbenempfindlichkeit eines Präparates, das 4 Stunden lang auf 210° erhitzt worden war, und zwar wurde Kurve I bei einer 8mal so großen Lichtstärke erhalten als II. Die Zelle war besonders empfindlich für kurzwelliges (blaues) Licht, während den roten Strahlen nur eine schwache Wirkung zukam. Das Maximum der Empfindlichkeit lag offenbar bei 500 μμ.

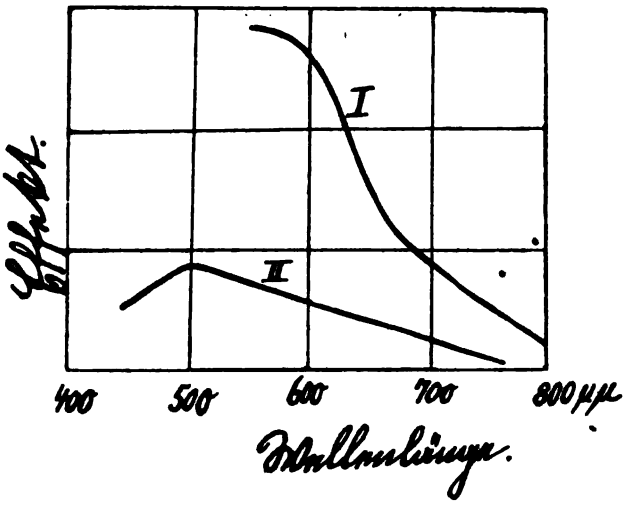


Fig. 90.

Ein in gleicher Weise hergestelltes Präparat, das eine Stunde auf 210° und dann 4 Stunden auf 200° gehalten worden war, zeigte das durch Fig. 91 wiedergegebene Verhalten. Die Kurve I wurde bei einer 10,5 mal so großen Lichtintensität gewonnen als Kurve II. Hier tritt bereits bei starker Belichtung in der Gegend von 700 μμ eine Unregelmäßigkeit auf.

Fig. 92 stellt die Empfindlichkeitskurven für ein Präparat dar, das ½ Stunde auf 210° und dann 6 Stunden auf 190° erhitzt worden war. Bei schwacher Beleuchtung (Kurve II) sehen wir wieder bei 500 μμ ein Maximum, bei 11 mal so starker Beleuchtung tritt außerdem ein deutliches Maximum in der Gegend von 720 μμ auf (Kurve I).

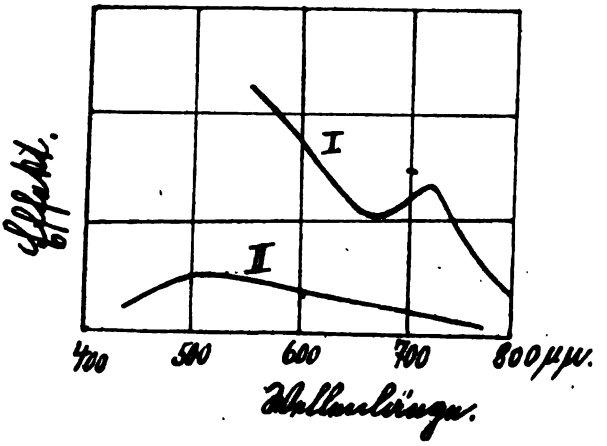


Fig. 91.

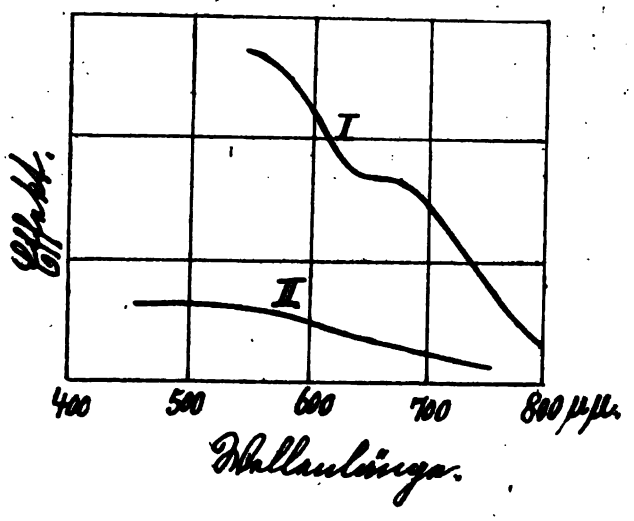


Fig. 92.

Schließlich wurde ein Präparat eine halbe Stunde bei 210° und dann bei 170° auskristallisiert. In kräftigem Lichte trat ein ausgesprochenes Maximum bei 700 μμ auf (Kurve I in Fig. 93), während die Empfindlichkeitskurve bei 8,4 mal so schwacher Belichtungsstärke (Kurve II) keine bestimmten

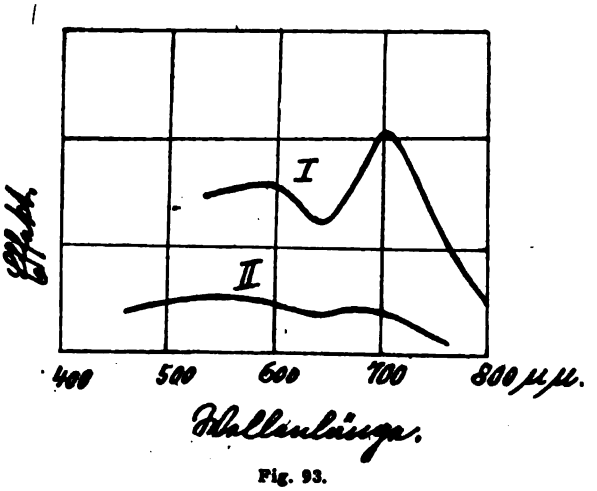


Fig. 93.

Maxima erkennen läßt. Bei kräftiger Belichtung überwiegt hier die Empfindlichkeit für Rot entschieden diejenige für Blau.

Man ersieht aus dieser Versuchsreihe, daß sich beim Übergang zu tieferen Kristallisationstemperaturen die Farbenempfindlichkeit nach dem längeren Wellenlängenbereich verschiebt und daß an Stelle der Violettempfindlichkeit ein ausgesprochenes Maximum für rotes Licht sich ausbildet. Dieses Maximum im Roten wird besonders durch langsame Abkühlung begünstigt. Kurve I in Fig. 94 ist charakteristisch für

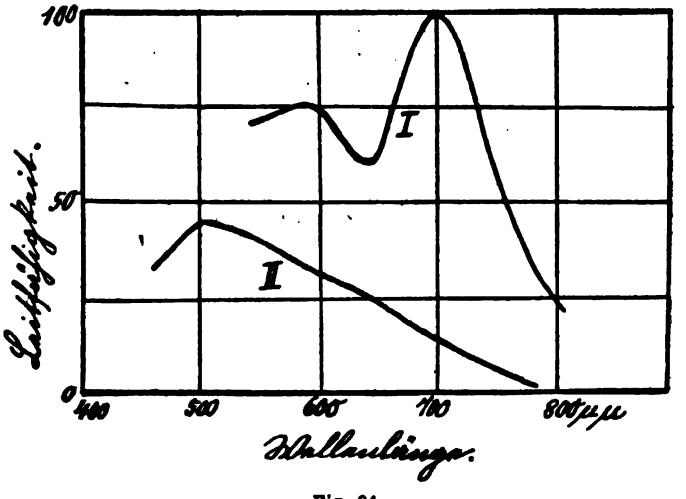


Fig. 94.

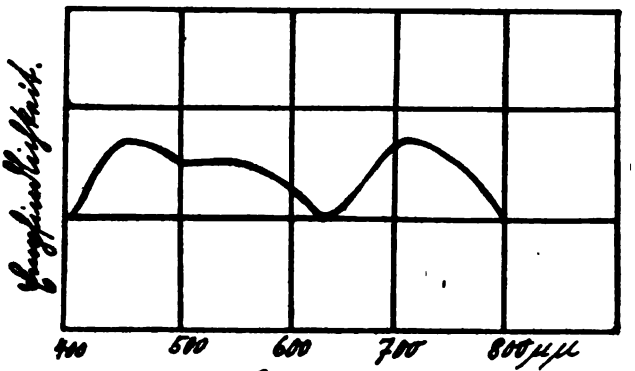


Fig. 95.

Zellen, die langsam gekühlt werden; sie zeigen ein Maximum bei 700 μμ. Dagegen wurde durch Erhitzen auf 210° und rasche Kühlung ein Maximum bei 500 μμ erhalten (Kurve II in Fig. 94). Bei sehr langer Erhitzung auf 180° entstanden 2 Empfindlichkeitsmaxima; beide waren von ungefähr gleicher Größe und sehr scharf bestimmt und zwar bei 440 μμ bezw. 710 μμ (Fig. 95).

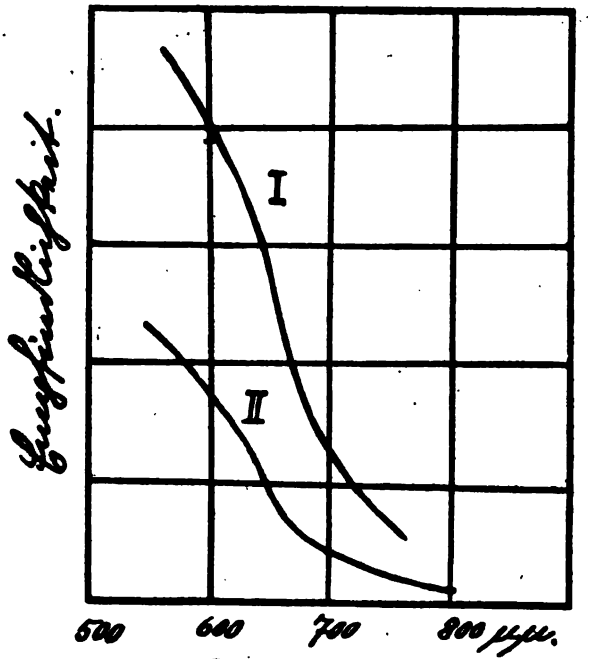


Fig. 96.

Im allgemeinen kann man also 2 Arten von Selenzellen unterscheiden, Zellen, die ihr Empfindlichkeitsmaximum im Blau oder Violett haben, und Zellen, die besonders stark auf rotes Licht reagieren.

Die erste Art, die sogenannte Dietrichzelle, ändert ihren Charakter bezüglich der Farbenempfindlichkeit nicht, wenn die Stärke und Dauer der Belichtung wechselt. So wurde Kurve I in Fig. 96 bei 50 mal so großer Lichtintensität gewonnen als Kurve II. Daß die Änderung der Belichtungszeit keinen Einfluß auf die Form der Kurve hat, erkennt man ohne weiteres aus Fig. 97; Kurve I wurde bei einer Belichtungsdauer von 0,4 Sekunden, Kurve II bei 30 Sekunden Expositionsdauer gewonnen.

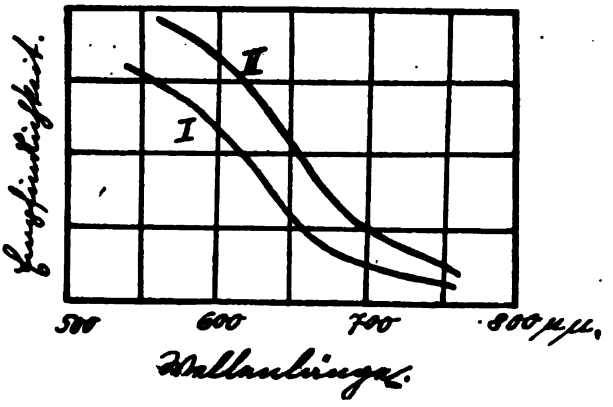


Fig. 97.

Die zweite Zellenart, die besonders auf rotes Licht reagiert und von Dietrich als Giltaytype bezeichnet wird, ändert mit dem Wechsel der Lichtstärke die Gestalt der Empfindlichkeitskurve. Die Fig. 98 läßt das Verhalten dieser Zellenart bei verschieden starker Beleuchtung ersehen. Kurve I wurde bei der Lichtstärke 8,4 und 4 Sekunden langer Bestrahlung erhalten, Kurve II bei der Lichtintensität 1 und bei 0,4 Sekunden langer Belichtungsdauer. Das Maximum für rotes Licht verschwindet also mit Abnahme der Lichtintensität und Belichtungsdauer immer mehr und die Giltay-Kurve geht in eine Dietrich-Kurve über. Damit wird das bereits von Pfund (S. 108) gefundene Resultat bestätigt.

Wurden die Messungen an den fertigen Zellen bei verschiedenen Temperaturen vorgenommen, so zeigten sich starke Verschiebungen der Maxima bei der Giltaytype, während die Dietrichzelle gegen Temperaturschwankungen weniger empfindlich war. Fig. 99 stellt die Kurven dar, die mit

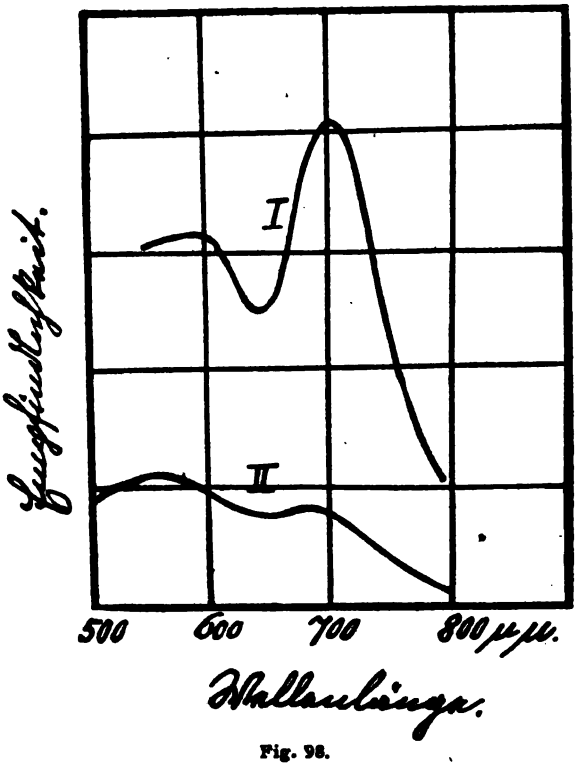

Empfindlichkeit.
I
II
500
600
700
800 μμ.
Wellenlänge.

Fig. 98.

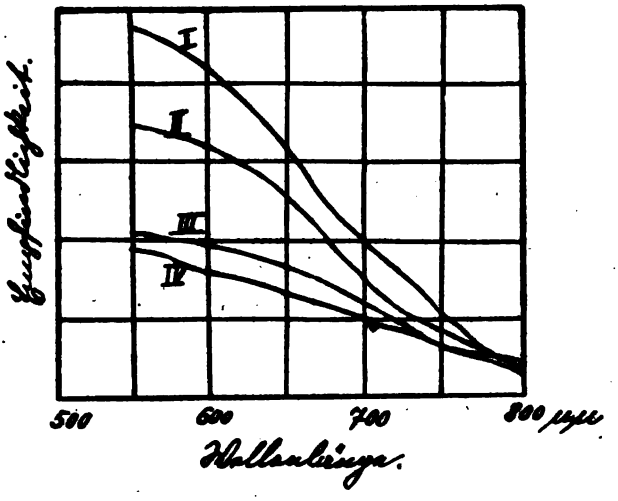

Empfindlichkeit.
I
II
III
IV
500
600
700
800 μμ
Wellenlänge.

Fig. 99.

dem Dietrichtyp erhalten wurden. Kurve I zeigt die Empfindlichkeit für die verschiedenen Wellenlängen bei einer Temperatur von 23°, Kurve II bei 61°, III bei 81,5° und IV bei 132° für ein und dieselbe Zelle. Die Belichtungsdauer war in den 3 ersten Fällen je 5 Sekunden. Die Empfindlichkeit für die brechbareren Strahlen nimmt mit Temperaturerhöhung merkbar ab, während sie für die langwelligen Strahlen weniger beeinflußt wird. Bei der Giltaytype trat mit Zunahme der Temperatur eine Verschiebung des roten Maximums nach dem längeren Wellenlängenbereich ein. Fig. 100 zeigt drei Kurven, die an ein und demselben Giltay-Präparat bei 20° (Kurve I) bezw. 59° (Kurve II) bezw. 92° (Kurve III) gewonnen wurden.

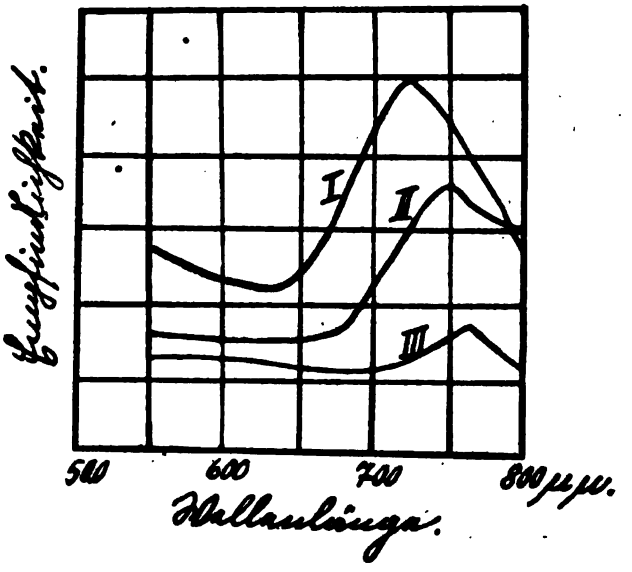


Fig. 100.

Nach Abkühlung tritt jedoch das Maximum der Empfindlichkeit wieder an der ursprünglichen Stelle auf, wie aus Fig. 101 zu ersehen ist. Die Kurven V und N, von denen die erste vor, die zweite nach Erwärmung einer Giltayzelle erhalten wurde, stimmen in ihrer Form gut überein. Durch eine vorübergehende Temperaturänderung wird demnach der Charakter einer Zelle bezüglich ihrer Farbenempfindlichkeit nicht geändert.

Diese Beobachtung Dietrichs, daß sich mit Temperaturerhöhung das Empfindlichkeitsmaximum für rotes Licht nach dem ultraroten Ende des Spektrums verschiebt, wird durch die Versuchsergebnisse von Elliot (462) bestätigt. Letzterer

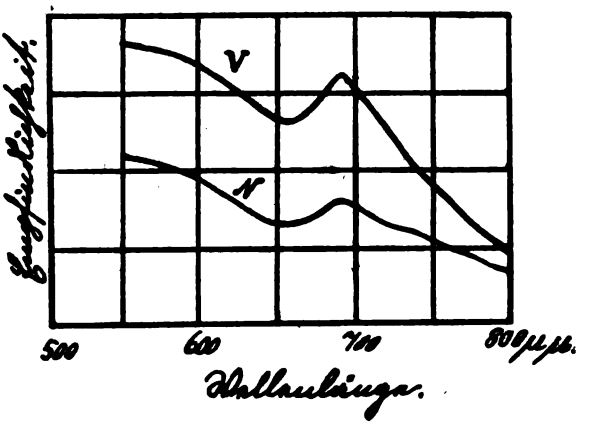


Fig. 101.

fand, daß beim Übergang zu sehr tiefen Temperaturen das im Rot liegende Maximum nach kleineren Wellenlängen rückt. Kurve I in Fig. 102 zeigt die Lage des Maximums bei Zimmertemperatur (+ 23,5 ° C). Als die Temperatur auf —190 ° C erniedrigt und der Versuch wiederholt wurde, war nicht bloß eine Verschiebung des Maximums um nahezu 100 μμ nach dem kurzwelligen Teil des Spektrums, sondern auch eine Erweiterung des Empfindlichkeitsbereiches nach dem langwelligen Ende bis zu 2000 μμ zu beobachten (Kurve II).

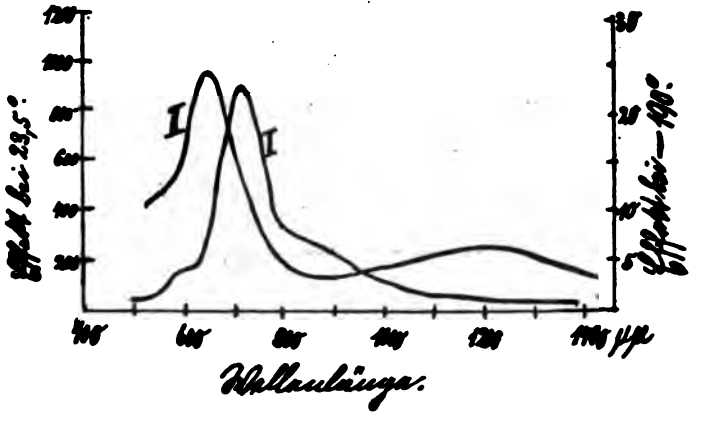


Fig. 102.

Schließlich sei noch auf die viel älteren Versuche von Marc (192) hingewiesen. Er fand bereits, daß die Empfindlichkeit für die einzelnen Lichtfarben sich mit der Tempe-

ratur in verschiedenem Maße änderte und zwar waren die Änderungen je nach der Konstruktion der Zellen verschieden.

Über die Abhängigkeit der Farbenempfindlichkeit von der Temperatur vergl. auch vorigen Abschnitt.

Große Verdienste um die Selenforschung erwarben sich Brown und Sieg durch ihre Untersuchungen an Selenkristallen. Brown (456) erhielt bei Erhitzung des geschmolzenen Selens auf 190 bis 220° C während 1 bis 2 Wochen nadelförmige Kristalle des hexagonalen Systems. Wurde jedoch geschmolzenes Selen bei 170° C während langer Zeit im Vakuum oder auch bei 190° C unter Atmosphärendruck erhitzt, so entstanden Kristalllamellen des monoklinen Systems. Die Kristalle wurden zu den Untersuchungen zwischen Elektroden festgeklemmt.

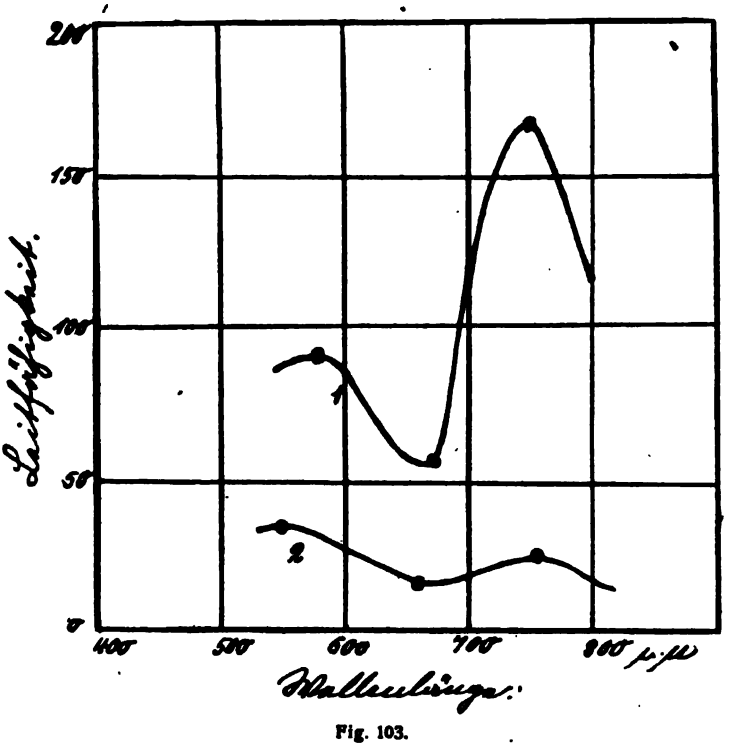


Fig. 103.

Die Kurven in Fig. 103 zeigen die Farbenempfindlichkeit von 2 verschiedenen Kristallen von Brown (434). Kurve 1 wurde erhalten mit einem Kristall, der bei hoher Temperatur von ca. 200° aus dem Schmelzfluß gewonnen worden war; das Maximum der Empfindlichkeit lag bei ca. 750 μμ. Wesentlich anders verhielt sich ein bei tieferer Kristallisa-

tionstemperatur (ca. 150° C) erhaltener Kristall, der neben einem kleinen Maximum in der Gegend von 750 μμ ein größeres bei 550 μμ besaß (Kurve 2). Auffallender Weise hat Dietrich (S. 116) an Selenzellen bei sehr hoher Kristallisationstemperatur ein Maximum bei 500 μμ, bei niedrigerer aber ein Maximum in der Gegend von 700 μμ, also ein entgegengesetztes Resultat gefunden.

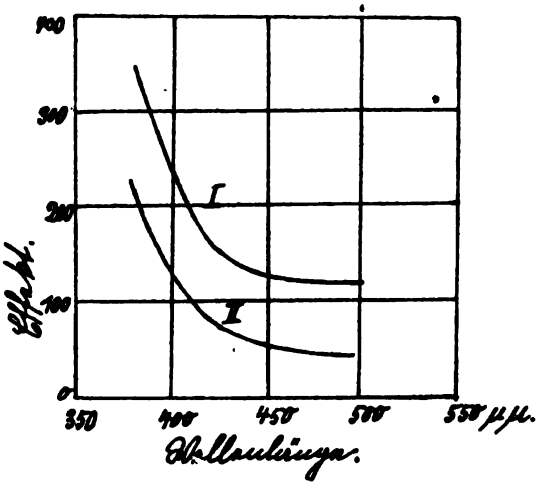


Fig. 104.

Sehr interessant war das Verhalten eines nadelförmigen Kristalles (Kurve I in Fig. 104) und eines Lamellenkristalles (Kurve II) gegen verschiedenfarbiges Licht. Brown und Sieg (470) beobachteten im ganzen untersuchten Gebiet ein beständiges Anwachsen der Lichtempfindlichkeit bei abnehmender Wellenlänge. Die maximale Empfindlichkeit lag also hier offenbar im Ultravioletten. Die Lichtenergie mußte größer gewählt werden als es durchschnittlich der Fall war.

Im allgemeinen kamen Brown und Sieg (432, 449, 455) bei ihren Untersuchungen an den Selenkristallen zu folgenden Resultaten: Die elektrische Leitfähigkeit ist durch den ganzen Kristall verteilt. Durch Druck und elektrische Kräfte läßt sich die Leitfähigkeit erhöhen; der Leitfähigkeitszuwachs erfolgt aber nur an derjenigen Stelle, an der die Kraft selbst angreift. Dagegen ist der Lichteffekt im Selenkristall nicht an die belichtete Stelle gebunden, er dehnt sich über 1 cm seitwärts von der belichteten Stelle, sogar auf andere angewachsene und gegen Licht geschützte Kristalle aus. Die Kristallformen sind je nach der Herstellung und Behandlung verschieden. Dies erkennt man z. B. an den Empfindlich-

keitskurven als Funktion der Wellenlänge für gleiche absorbierte Energie; sie sind für die einzelnen Kristalle verschieden und zeigen im allgemeinen dieselbe Form wie die entsprechenden Kurven verschiedener Selentypen. Jede einzelne Kristallform hat ihre eigene charakteristische Kurve, die in ihrem Lauf unabhängig ist von Druck, Potentialdifferenz und Lichtintensität. Dagegen ist die Form der Kurve, wie wir gleich sehen werden, wesentlich bedingt durch die Richtung des Lichtes inbezug auf die kristallographischen Achsen der Kristalle und unter bestimmten Bedingungen auch von der Polarisation des Lichtes abhängig.

Da die Kristalle Doppelbrechung zeigen, war zu erwarten, daß sie bei Beleuchtung nach verschiedenen Achsen verschiedene elektrische Eigenschaften aufweisen. Wenn die Beleuchtung in der Richtung des Pfeiles I (Fig. 105) auf die

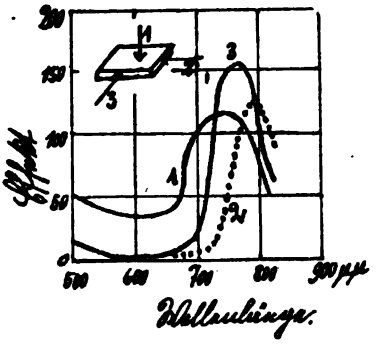


Fig. 105.

breite Fläche fiel, nahm die Empfindlichkeit bei 660 μμ rasch zu und zeigte ein breites Maximum bei einer mittleren Lage von 740 μμ. Bei Beleuchtung in der Richtung 2 setzte die Zunahme erst bei 720 μμ ein, das Maximum lag in der Gegend von 790 μμ. Beleuchtung in der Richtung 3 führte zu einem Maximum bei 760 μμ. Die Verschiebung des Maximums bei Änderung der Beleuchtungsrichtung bezw. der beleuchteten Seitenfläche kann also bedeutend sein.

Polarisiertes Licht vermag unter bestimmten Bedingungen die Empfindlichkeitskurve zu beeinflussen. Bei Änderung des Einfallswinkels erhielten Brown und Sieg (449) an einem Lamellenkristall verschiedene Empfindlichkeitskurven. Für einen Winkel von 60° trat eine ausgesprochene Änderung in dem Charakter der Kurve auf (Kurve 60 in Fig. 106), während für größere und kleinere Winkel die Form der Kurve so gut wie

Fig. 106.

unverändert blieb. Die Kurven 0 bezw. 30 bezw. 82 wurden gewonnen bei Einfallswinkeln von 0 bezw. 30 bezw. 82°. Bei ihnen liegt das Empfindlichkeitsmaximum an der gleichen Stelle, während es bei einem Einfallswinkel von 60° wesentlich nach dem längeren Wellenlängenbereich verschoben ist.

VIII. Abhängigkeit der Leitfähigkeit und Lichtempfindlichkeit vom Druck.

Es ist eine bekannte Tatsache, daß eine Selenzelle, bei der das Selen zwischen den Elektroden eingeschmolzen ist, einen wesentlich geringeren Widerstand hat als ein Selenpräparat, bei welchem eine dünne Selenschicht lediglich zwischen zwei Elektroden festgeklemmt wird. Während bei dem zuletzt genannten Selenpräparat der Kontaktwiderstand von Selen und Elektrode ganz beträchtlich ist, bleibt er bei der Selenzelle verhältnismäßig gering. Bei Anwendung eines Drukkes wird daher in dem einen Falle der Übergangswiderstand erheblich herabgesetzt, während dies bei der Selenzelle kaum mehr der Fall ist. Es wird deshalb bei dem Selenpräparat die Einwirkung des Druckes auf das Selen selbst überdeckt durch die Herabminderung des Kontaktwiderstandes. Bei der Beurteilung der von den einzelnen Forschern gefundenen Resultate müssen wir diese Tatsache in Betracht ziehen.

Übt man auf graukristallisches Selen einen Druck aus, so sinkt sein elektrischer Widerstand. Brown und Stebbins (304) erhielten an Selenzellen in dem Bereich von 1—450 Atmosphären eine Widerstandsabnahme von 0,05 bis 0,3 % für 1 Atm. Druckänderung, Montén (308) bei einem Druck von 3000 Atmosphären eine solche von 0,5 bis 2 %. Während Brown und Stebbins bei Drucken bis 450 Atm. nur geringe oder fast gar keine Hysteresis beobachteten, fand Montén, daß der Widerstand nach Anwendung

eines sehr hohen Druckes sich nur langsam seinem ursprünglichen Wert wieder nähert und sogar eine dauernde Änderung aufweist.

Nach dem allgemein gültigen Gesetz über den Zusammenhang von Widerstand und Lichtempfindlichkeit (S. 64) müßte bei Drucksteigerung zugleich mit der Widerstandsabnahme ein Empfindlichkeitsverlust verbunden sein. Tatsächlich fanden Brown und Stebbins (269) bei Drucken zwischen 0 und 600 Atm. eine ungefähr dem Drucke proportionale Abnahme der Lichtempfindlichkeit. Dieser Einfluß des Druckes ist ein unmittelbarer und nicht etwa durch Änderung des Kontaktwiderstandes hervorgerufen. Besonders wichtig ist die Tatsache, daß die prozentuelle Abnahme des Anfangswiderstandes bei Belichtung die gleiche ist, mag der Anfangswiderstand durch Druck oder Temperaturerhöhung herabgesetzt worden sein. Diese Beobachtung bestätigt aufs neue, daß die Empfindlichkeit zugleich mit dem Widerstand abnimmt, gleichgültig auf welchem Wege die Widerstandsabnahme erzielt wird.

Erschütterungen erweisen sich von Einfluß auf die Trägheit des Selens, indem nach längerer Belichtung die Rückkehr zum Dunkelwert durch Klopfen eine sprunghafte Beschleunigung erfährt (Hesehus 79—81). Durch Abfeilen (Brown 369) oder Bearbeitung der Selenoberfläche mit dem Sandstrahl (Giltay 336) erhält ein Selenpräparat eine vorübergehende Leitfähigkeitsänderung. Abschaben auch nur einer kleinen Selenmenge bewirkt an einem normalen Präparat eine Leitfähigkeitserhöhung; im Lichte ist die Leitfähigkeit auch erhöht, die Empfindlichkeit aber geringer. Die Leitfähigkeit kehrt erst nach sehr langer Zeit (ca. 1 Monat) auf ihren ursprünglichen Wert zurück, die Erholung geht also sehr langsam vor sich. Negativ lichtempfindliches Selen (S. 162) verhält sich beim Abfeilen der Oberfläche entgegengesetzt, indem es eine Leitfähigkeitsabnahme zeigt (Brown 369); die Erholung nimmt ebenfalls sehr lange Zeit in Anspruch.

Brown (434, 455, 458) untersuchte den Einfluß des Druckes auf die Leitfähigkeit und Lichtempfindlichkeit von Selenkristallen. Die Versuche wurden in der Weise ausgeführt, daß er einen Lamellenkristall zwischen zwei Elektroden festklemmte und letztere mit einer Stromquelle und einem elektrischen Meßapparat verband. Der Druck wurde in der Richtung des Stromes ausgeübt, die Druckmehrung durch Gewichtsauflage erzielt. Eine Druckzunahme von 180 Atmosphären erhöhte die Leitfähigkeit der Kristalle im Dunkeln um das 120fache. Auffallender Weise war dabei die absolute Lichtempfindlichkeit proportional der Dunkelleitfähigkeit, erst bei sehr hohen Drucken nahm sie ab und wurde etwa bei einer Million Atmosphären praktisch gleich Null. Die untere Kurve in

Fig. 107 zeigt die Veränderung der Leitfähigkeit mit dem Drucke im Dunkeln, die obere im Lichte.

Mittels der in Fig. 108 vergrößert dargestellten Anordnung wurde bald am Ende 1, bald am Ende 2 der Druck und die Beleuchtung geändert und die Wirkung verfolgt. Wurde am Ende 2 der Druck geändert, so konnte dadurch die Leitfähigkeit bei 1 in keiner Weise beeinflußt werden. Es zeigte sich, daß die Erhöhung der Leitfähigkeit durch Druck nur an derjenigen Stelle des Kristalles auftritt, an der die Kraft selbst angreift. Der Druckeffekt überträgt sich nicht auf Teile außerhalb der Druckstelle. Wurde dagegen das Ende 2 beleuchtet,

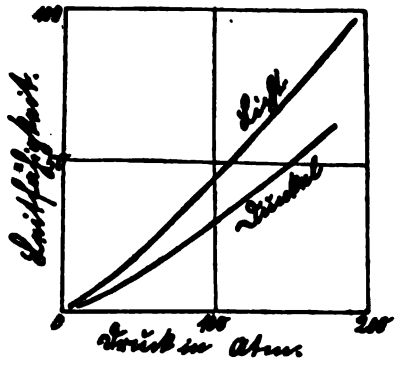


Fig. 107.

so änderte sich die Leitfähigkeit an 1 beinahe ebensoviel als am beleuchteten Ende 2. Der Lichteffekt im Selenkristall ist also nicht an die beleuchtete Stelle gebunden, er dehnt sich auch auf die gegen Licht geschützten Stellen aus. Der Lichteffekt ist also anderer Natur als der mechanische Seleneffekt. Wurde der Druck am Ende 2 erhöht, so nahm die absolute Lichtempfindlichkeit an diesem Ende beinahe proportional dem Drucke zu, während am Ende 1 keinerlei Änderung eintrat. Aus Unregelmäßigkeiten bei sehr kleinen Drucken ergab sich eine kleine Wirkung des Kontaktwiderstandes Elektrode-Selen.

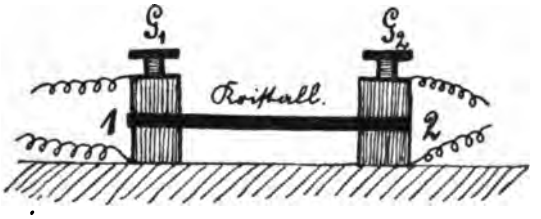


Fig. 108.

Aus der Proportionalität bei weiterer Druckzunahme schloß aber Brown, daß für die Druck- und Lichtwirkung nur Vorgänge im Selen selbst maßgebend seien.

Die Beobachtung von Brown, daß die Lichtempfindlichkeit von Selenkristallen proportional mit der Leitfähigkeit bei Druckzunahme anwächst, ist eine höchst merkwürdige Erscheinung; denn in allen anderen Fällen, in denen die Dunkelleitfähigkeit unter irgend welchen Einflüssen zunimmt, fällt die Lichtempfindlichkeit ab. Es wäre daher auffallend, wenn an Selenkristallen bei Anwendung eines mechanischen Druckes das sonst allgemein gültige Gesetz über den Zusammenhang von Leitfähigkeit und Lichtempfindlichkeit keine Geltung haben sollte. Es lagern sich hier offenbar 2 Wirkungen übereinander, zumal Brown selbst die Beobachtung gemacht hat, daß bei hohen Drucken die Lichtempfindlichkeit der Kristalle mit Zunahme der Leitfähigkeit abnimmt. Auch haben Brown und Stebbins (S. 269) an Selenzellen allgemein eine ungefähr dem Drucke proportionale Abnahme der Lichtempfindlichkeit beobachtet. Wenn ein Kristall lediglich zwischen 2 Elektroden festgeklemmt wird, scheint mir der Übergangswiderstand Elektrode-Selen bei niedrigeren Drucken wesentlich größer zu sein als der Widerstand des Kristalles selbst, so daß der Lichteffekt kaum zur Geltung kommen kann; je mehr dann der Kontaktwiderstand durch den Druck herabgesetzt wird, desto mehr macht sich der Einfluß des Lichtes bemerkbar. Ist dann der Kontaktwiderstand auf eine bestimmte Größe gesunken, so daß der Gesamtwiderstand dadurch nicht mehr wesentlich beeinflußt wird, so kommt die Wirkung des Druckes auf den Kristall selbst zur Geltung und diese besteht in einer Herabminderung der Empfindlichkeit. Meiner Meinung nach hat eine fortgesetzte Druckzunahme eine langsame Empfindlichkeitsabnahme des Kristalles selbst und eine rasche Abnahme des beträchtlichen Kontaktwiderstandes zur Folge, so daß bei niedrigeren Drucken die an sich sehr hohe Empfindlichkeit des Kristalles mit der Druckzunahme zu wachsen scheint. Daß es sich bei der genannten Erscheinung hauptsächlich um die Herabsetzung des Kontaktwiderstandes handelt, wird übrigens durch die Beobachtung von Brown selbst, wonach sich der Druckeffekt nur auf die gedrückte Stelle beschränkt, ausdrücklich bestätigt.

IX. Die Trägheit des Selens.

Die Selenzelle verdankt ihre Bedeutung der Lichtempfindlichkeit, jener wunderbaren Eigenschaft, daß die elektrische Leitfähigkeit des Selens mit der Belichtung variiert, so daß alle Lichtänderungen entsprechende Stromschwankungen hervorzurufen vermögen. Dieses merkwürdige Verhalten des Selens wäre für die Elektrotechnik von höchster Bedeutung, wenn sich nicht eine recht störende Eigenschaft, die Trägheit des Selens, zugesellte. Mit dem Auffallen der Lichtstrahlen nimmt nämlich die Leitfähigkeit nicht sofort einen konstanten Höchstwert an, sie erfährt vielmehr während der Dauer der Belichtung wesentliche Veränderungen, die je nach der Zellenart recht verschiedenartig sind; auch kehrt das elektrische Leitvermögen mit der Abdunkelung der Zelle nicht augenblicklich auf den ursprünglichen Dunkelwert zurück, sondern nähert sich ihm nur allmählich und zwar erst rasch, dann immer langsamer. Gerade dieses Nachhinken der Selenzelle nach der Verdunkelung wirkt recht störend. Die Trägheit des Selens beeinflußt natürlich die bei Belichtungsänderungen auftretenden Stromschwankungen ungünstig und setzt den Wert des Selens beträchtlich herab. Man hat daher durch die verschiedensten Mittel versucht, diesen Selenfehler zu beseitigen oder wenigstens nach Möglichkeit herabzusetzen. Dazu ist natürlich eine genaue Kenntnis der Trägheitserscheinungen und ihrer verschiedenartigen Ursachen erforderlich. Wir werden sehen, daß die Trägheit des Selens von sehr vielen Faktoren abhängig ist.

1. Abhängigkeit der Trägheit von der Sensibilisation.

Die 3 Kurven in Fig. 109 lassen die Leitfähigkeitsänderungen von drei verschiedenen Zellenarten bei fünf Minuten langer Belichtung und nachfolgender Verdunkelung deutlich erkennen. Die Leitfähigkeit der ersten Zellenart (Kurve I) steigt mit dem Auffallen der Lichtstrahlen nur mäßig an, um bei andauernder Belichtung noch kräftig zuzunehmen. Ähnlich verhält sich die Zelle bei Verdunkelung; die Leitfähigkeit geht nur allmählich gegen den Dunkelwert zurück und hat ihn nach 5 Minuten noch nicht erreicht. Bei der zweiten Zellenart (Kurve II) findet im Licht ein momentaner rascher Anstieg und anschließend nur mehr eine geringere Zunahme der Leitfähigkeit statt; bei Abdunkelung nähert sich die Leitfähigkeit rascher dem Dunkelwert, erreicht ihn aber auch nach 5 Minuten noch nicht. Kurve III schließlich steigt fast momentan zu einem Höchstwert an, um erst rasch, dann langsamer auf ein Minimum abzufallen. Die Abnahme der

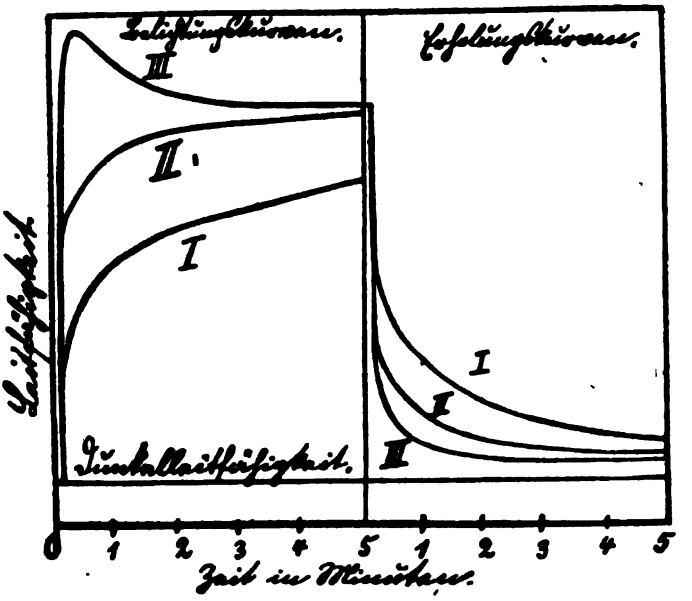


Fig. 109.

Leitfähigkeit bei andauernder Bestrahlung heißen wir Ermüdung. Diese Zellenart erholt sich bei Verdunkelung am raschesten.

Zellen der 1. Art heißt man gewöhnlich hart, solche der 2. und 3. Art weich (S. 73). Erstere erhält man im allgemeinen durch Erhitzen des amorphen Selens auf ca. 170° C. Zellen der 2. Art entstehen bei einer Kristallisationstemperatur von 195 bis 200°, während man bei langdauernder Erhitzung über 200° oder durch Kristallisieren geschmolzenen Selens gewöhnlich Zellen der 3. Art erhält. Auch die Art der Abkühlung ist von Einfluß auf die Eigenschaften der Zellen (S. 28).

Vergleichen wir die Belichtungskurven mit den Erholungskurven, so sehen wir zunächst, daß die Zellen sich um so rascher erholen, je weicher sie sind. Dann fällt uns auf, daß die Trägheit nach der Bestrahlung, die Verdunkelungsträgheit, größer ist als die Belichtungsträgheit d. h. die Trägheit während der Bestrahlung. Die Unterschiede in der Art der Leitfähigkeitszunahme während der Belichtung entsprechen bei den einzelnen Zellen den Unterschieden bei der Erholung. Wird eine Zelle eine bestimmte Zeit andauernd dem Lichte ausgesetzt, so hat sie sich nach der gleichen Zeit der Verdunkelung noch nicht auf den ursprünglichen Dunkelwert erholt. Wir sehen, daß in der belichteten Selenzelle gleichsam eine Aufspeicherung von Energie stattgefunden hat; das Selen behält sozusagen etwas

Licht zurück. Man hat dieses Nachhinken des Selens nach erfolgter Belichtung auch als Nachwirkung des Lichtes im Selen bezeichnet (Kalischer 90).

Die in Fig. 109 gezeichneten Trägheitskurven (Belichtungs- und Erholungskurven) wurden in der Weise gewonnen, daß man mit einem Galvanometer innerhalb längerer Zeiträume, etwa von Minute zu Minute, nach erfolgter Belichtung bezw. Verdunkelung die Ausschläge des Instrumentes beobachtete und nach diesen Ablesungen die entsprechenden Werte einzeichnete. Diese Kurven haben jedoch nur für diejenigen Anwendungsgebiete der Selenzellen Bedeutung, bei denen es sich um Wiedergabe langsamer Lichtschwankungen handelt. Für alle Fälle aber, in denen die Selenzelle zur Ausnutzung schneller Belichtungsänderungen herangezogen werden soll, ist die Kenntnis kurzzeitiger Trägheitskurven nötig. Derartige Kurven wurden unter Benutzung eines Oszillographen für sehr kurze Belichtungs- und Verdunkelungszeiten von verschiedenen Forschern, insbesondere von Glatzel (354, 375), aufgenommen. Ähnliche Versuche mit intermittierender Beleuchtung wurden bereits von Bellati und Romanese (53), sowie von Majorana (130) angestellt; letztere fanden, daß der Widerstand des Selens bei intermittierender Beleuchtung im allgemeinen unabhängig ist von der Zahl der sekundlichen Belichtungen und Verdunkelungen. Dagegen ändert sich der Zellenwiderstand, wenn man das Verhältnis von Belichtungszeit t_1 zu Verdunkelungszeit t_2 ändert, wenn man also z. B. die Belichtungszeit dreimal so klein als die nachfolgende Verdunkelung macht, so daß $t_1 : t_2 = 1 : 3$ (Glatzel).

Belichtet man eine Selenzelle mit einer konstanten Lichtquelle intermittierend, was mit dem photophonischen Rad (S. 75) leicht möglich ist, so nehmen sowohl die maximalen Leitfähigkeiten bei Belichtung als auch die Dunkelwerte bei den nachfolgenden Verdunkelungen sehr bald konstante Werte an. Die Kurven in Fig. 110 und 111 zeigen die Leitfähigkeits-

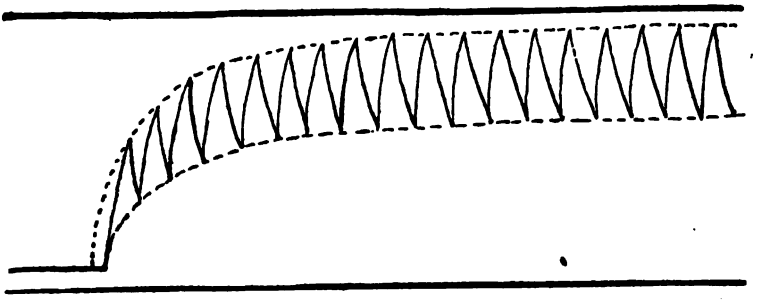


Fig. 110.

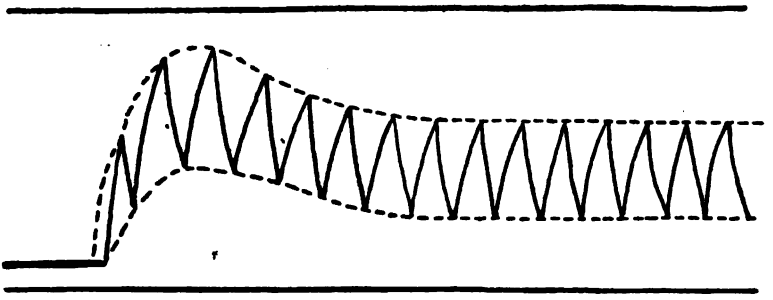


Fig. 111.

änderungen für eine Zelle der 2. bezw. 3. Art bei intermittierender Beleuchtung (die entsprechenden Änderungen für ununterbrochene Belichtung sind aus den Kurven II und III in Fig. 109 zu ersehen). Die obere punktierte Kurve gibt die Veränderung der maximalen Leitfähigkeiten bei den aufeinander folgenden Belichtungen, die untere punktierte Kurve die zugehörigen Dunkelwerte an. Die zwischen diesen beiden Umhüllungskurven im Zickzack verlaufenden Kurven zeigen die Schwankungen des die Zelle durchfließenden Stromes während der intermittierenden Beleuchtung. Der Strom klettert im ersten Falle (Fig. 110) allmählich hinauf und pendelt dann zwischen 2 festen Grenzwerten hin und her. Im 2. Falle steigt er schnell an, um nachher wieder etwas abzufallen. In beiden Fällen aber laufen die zwei Umhüllungskurven bereits nach 5 bis 6 Intermittenzen einander völlig parallel, woraus man ersieht, daß die Trägheit schon nach wenigen Lichtschwankungen einen konstanten Wert annimmt.

2. Die Abhängigkeit der Trägheit von der Dauer und Stärke der Belichtung.

Die Leitfähigkeit erreicht bei starker Lichtintensität für harte und weiche Zellen viel rascher das Maximum als bei schwacher Beleuchtung. Bei harten Zellen, deren Leitfähigkeitszunahme in mäßigem Lichte durch Kurve I in Fig. 109 wiedergegeben ist, dauert es 4 bis 5 Stunden, bis das Maximum der Leitfähigkeit erreicht ist. Durch Steigerung der Beleuchtungsstärke kann der Vorgang entsprechend abgekürzt werden und zwar um so mehr, je weicher das Präparat ist. Bei Zellen mit Ermüdung (Kurve III in Fig. 109) steigt die Leitfähigkeit schon in den ersten Sekunden der Belichtung zum Höchstwert an. Bei schwacher Belichtung läßt sich dieses Anwachsen des Leitwertes noch leicht verfolgen, während bei intensiver Bestrahlung das Maximum schon in Bruchteilen einer Sekunde erreicht wird. Sperling (292) erhielt den Höchstwert der Leit-

fähigkeit, als er das Licht einer Lampe in seine Farben zerlegte, bei der energiereichen roten Strahlung an allen Zellen in wenigen Sekunden, während sich bei den anderen Farben das Maximum erst nach 30—60 Sekunden einstellte. Der während der Bestrahlung eintretende Rückgang der erhöhten Leitfähigkeit, den wir Ermüdung oder nach Sperling Schatteneffekt nennen, vollzieht sich erst rasch, dann langsamer und erreicht bei mäßiger Beleuchtung erst nach ca. 4 Stunden sein Ende; das Minimum der Leitfähigkeit stellt sich also im allgemeinen erst nach Stunden langer Bestrahlung ein.

Die Rückkehr der Leitfähigkeit nach der Bestrahlung zum ursprünglichen Dunkelwert nimmt um so mehr Zeit in Anspruch, je länger die Dauer und je größer die Intensität der Beleuchtung war. Die Verdunkelungsträgheit wächst also wie die Belichtungsträgheit mit der Dauer und Energie der Bestrahlung. Nach Glatzel (394) nimmt die Belichtungs- und Verdunkelungsträgheit beim Übergang von 50 auf 1100 Lux ungefähr im Verhältnis von 1:3 zu; demnach ist die Trägheit für größere Lichtenergie verhältnismäßig viel geringer als für schwache Beleuchtung, ein für die Praxis höchst wichtiges Ergebnis. Nach Dowell (351) hängt die Form der Erholungskurve nur von der Größe der anfänglichen Leitfähigkeitsänderung ab und nicht von der Zeit, in der sich diese Änderung vollzieht.

Fig. 112 zeigt die Erholungskurven einer Zelle von Torda (260) nach einer Bestrahlung von 2,5 bezw. 10 bezw. 20 Sekunden langer Dauer.

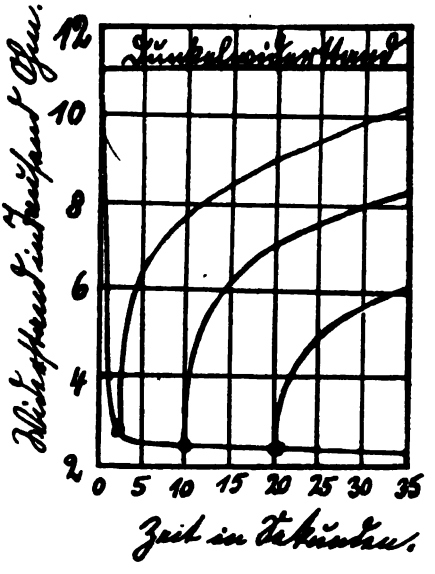


Fig. 112.

Nisco (214) fand, daß bei intermittierender Beleuchtung der Unterschied zwischen den Leitwerten bei Belichtung bezw. Verdunkelung bald einen konstanten Wert annimmt und daß diese Differenz der höchsten und tiefsten Leitwerte von der Beleuchtungsstärke abhängt.

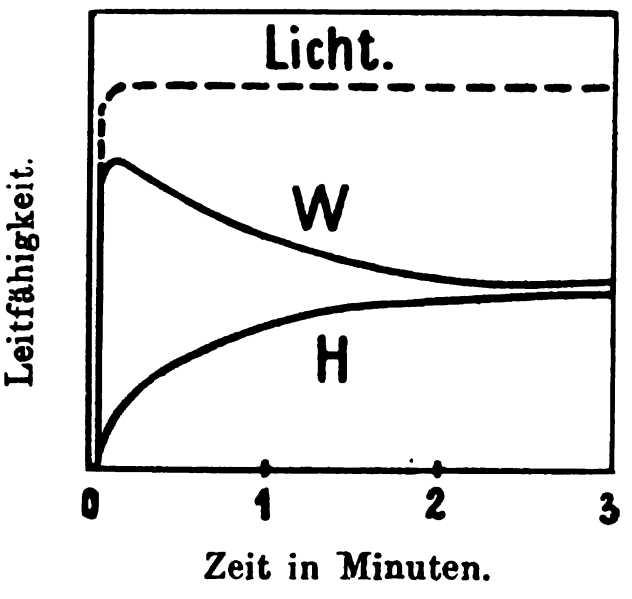


Fig. 113.

Ich (507) suchte eine harte und eine weiche Zelle aus, deren Leitfähigkeitsänderungen bei mäßiger Belichtung durch die Kurven H und W in Fig. 113 veranschaulicht werden. Wurden die beiden Zellen parallel geschaltet, so traten bei der gleichen Bestrahlung des Zellenpaares Veränderungen in der Stromstärke auf, wie sie ungefähr durch die punktierte Kurve der Figur dargestellt werden. Bei Anwendung einer größeren Lichtstärke aber zeigte die harte Zelle geringere Trägheit, die weiche Zelle aber größere Ermüdung (Fig. 114) und bei Parallelschaltung änderte sich die Stromstärke im Sinne der punktierten Kurve. Es ist also auf diesem Wege nicht möglich, für beliebige Lichtstärken einen konstanten Strom zu erreichen. Die gleiche Beobachtung konnte ich an Selenpräparaten machen, welche die weiche und harte Modifikation in sich vereinigten.

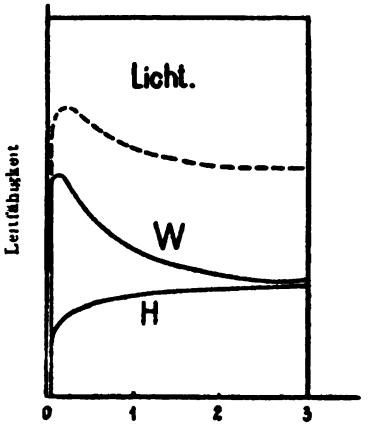


Fig. 114.

3. Abhängigkeit der Trägheit von der Dicke der Selenschicht.

Mit dem Auffallen der Lichtstrahlen erhält nur die äußere Oberfläche eine erhöhte Leitfähigkeit; allmählich aber dringt ein Teil des Lichtes ins Innere ein und erhöht auch die Leitfähigkeit der tiefer liegenden Schichten. Da sich die Einwirkung des Lichtes auf tiefere Schichten nur allmählich vollzieht, muß die Dicke der Selenschicht von Einfluß auf die Trägheit sein. Nach Marc (282), Korn (333), Gripenberg (396) u. a. wächst die Trägheit zugleich mit der Schichtdicke des Selens. Tatsächlich zeigen die gravierten Zellen, die nur einen feinen Selenüberzug erhalten, nur ganz geringe Trägheit. Leider kann man die Schichtdicke nicht beliebig verringern; denn sehr dünne Selenniederschläge lassen sich nur recht schwer in die kristallinische Form überführen und setzen dem Durchgange des Stromes einen hohen Widerstand entgegen.

Marc erbrachte den experimentellen Nachweis, daß die Trägheit mit der Dicke der Selenschicht abnimmt, auf folgendem Wege. In Fig. 115 sind 2 verschiedene Arten von Selenpräparaten dargestellt, wie sie Marc konstruiert hat. a sind die Elektroden, b ist bei Zelle I eine Glasplatte, bei Zelle II eine Specksteinrolle, c stellt die Selenschicht dar. Das Licht fällt in der Richtung der Pfeile auf. Während nun bei den Zellen der 1. Art das Maximum der Leitfähigkeit fast momentan mit dem Auffallen der Lichtstrahlen erreicht wurde, trat dasselbe bei denjenigen der 2. Art. erst nach ca. 40 Minuten ein. Es zeigten also die Zellen der 1. Art, bei denen das Licht auf die Stellen größter Stromdichte auffallen

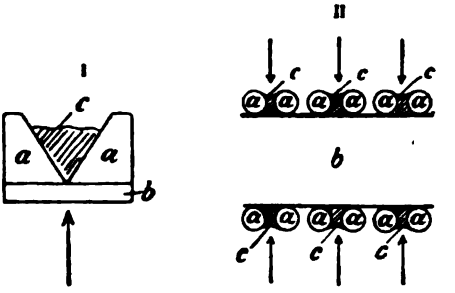


Fig. 115.

konnte, weit geringere Trägheit als die anderen, die an der Oberfläche dem Durchgang des Stromes einen größeren Widerstand entgegensetzen als an tiefer liegenden Stellen. Marc empfiehlt daher zur Herabminderung der Trägheit die Selenzellen so zu konstruieren, daß die Lichtstrahlen auf die Stellen größter Stromdichte auftreffen. Die Selenschicht zwischen den Elektroden muß also gegen die Oberfläche zu am dünnsten sein, auch soll das Selen an der Oberfläche die Elektroden nicht bedecken.

Marc berechnete die Tiefe, bis zu der das Licht im Innern des Selens eindringt, zu ca. 8.10^{-5} mm auf folgendem Wege. Ein Präparat mit einer 0,1 mm dicken Selenschicht hatte die Leitfähigkeit 20. Wenn nun die Leitfähigkeit, bei der keine Veränderung durch das Licht mehr eintritt, zu ca. 100000 angenommen wird, so müßte das Präparat, falls es in seiner ganzen Stärke durch das Licht verändert würde, etwa die 5000fache Leitfähigkeit annehmen. Da die tatsächliche Änderung nur den vierfachen Wert ergab, berechnete sich die wirksame Schicht zu ca. 8.10^{-5} mm.

Anknüpfend an die Berechnungen von Marc habe ich (383) seiner Zeit darauf hingewiesen, daß die ins Innere eindringende Lichtmenge doch nur sehr gering ist im Verhältnis zu der auf die Oberfläche treffenden Lichtenergie und daß infolge der Tiefenwirkung allein noch keine wesentliche Leitfähigkeitszunahme im Verlaufe der Belichtung auftreten würde. Eine besondere Rolle spielt hier die Tatsache, daß der spez. Widerstand metallischer Schichten bis zu einer Schichtdicke von der Größenordnung 10^{-5} mm konstant bleibt, mit abnehmender Schichtdicke dagegen sehr rasch wächst. Fällt nun das Licht auf eine Selenzelle, so muß die Dicke der Oberflächenschicht, die bei Bestrahlung eine erhöhte Leitfähigkeit erhält, mit dem Eindringen des Lichtes erst rasch, dann langsam zunehmen und sich so der kritischen Schichtdicke immer mehr nähern, was eine allmähliche Widerstandsabnahme der stromführenden Schicht zur Folge hat. Die Tiefenwirkung

äußert sich also in zweifacher Weise, es erfolgt eine Leitfähigkeitszunahme teils infolge einer direkten Beeinflussung der tieferen Schicht, teils infolge Anwachsens der stromführenden Oberflächenschicht bis zur kritischen Schichtdicke. Sobald das Licht bis zur kritischen Schichtdicke eingedrungen ist, fällt die Leitfähigkeitszunahme der zweiten Art weg und nun wird die Empfindlichkeit verhältnismäßig wenig wachsen. Die Richtigkeit dieser Anschauung wird durch die Tatsache gestützt, daß die Annäherung an ein Maximum durch Anwendung großer Lichtintensität viel rascher erreicht wird als bei schwacher Belichtung.

Brown (390) beobachtete die Änderung der Leitfähigkeit bei verschiedenen Anfangsleitfähigkeiten und berechnete daraus, daß bei seiner Zelle das Licht bis zu etwa einem Achtel der Dicke der Selenschicht eindringt. Nach seinen Untersuchungen dringt das Licht wesentlich tiefer in das Selen ein als Marc fand, und zwar bis zu 0,014 mm.

Gripenberg (438) erhielt an einer Selenzelle mit einer 0,05 mm dicken Selenschicht, auf deren eine Seite die Elektroden aufgepreßt waren (S. 55), annähernd die gleiche Lichtwirkung, ob er die Vorder- oder Rückseite der Selenschicht belichtete. Demnach durchdrang das Licht die 0,05 mm dicke Selenschicht fast vollständig.

Glatzel (394) verwendete bei einer Untersuchung der Frage, welcher Teil der Trägheit durch Diffusion in das Innere des Selens sich erklärt, die in Fig. 116 dargestellte Anordnung.

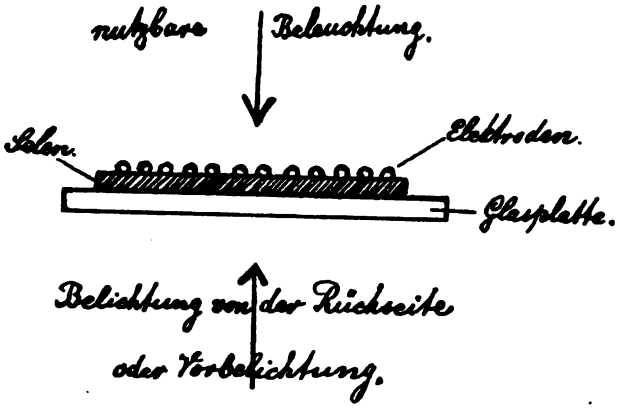


Fig. 116.

Als Träger der Selenschicht, die absichtlich verhältnismäßig stark gewählt wurde, benutzte er eine durchsichtige Glasplatte. Auf die gegenüberliegende Seite der Selenschicht waren die Elektroden aufgepreßt. Wurde nun die Zelle auf

der Vorderseite (Elektrodenseite) belichtet, so konnte stets eine starke Beeinflussung der Empfindlichkeit festgestellt werden, wenn gleichzeitig eine Belichtung von der Rückseite erfolgte oder eine Vorbelichtung durch die Glasplatte vorgenommen worden war. Mag auch durch die beim Kristallisieren entstehenden Lücken in der Selenschicht etwas Licht nach der Vorderseite hindurchdringen, so muß nach Glatzels Anschauung doch noch eine starke Diffusion an lichtempfindlichem Selen von den hinteren belichteten Stellen nach vorn vor sich gehen, die wesentlich größer angenommen werden muß, als sie sich aus den Marcschen Untersuchungen ergeben hatte.

Schließlich sei noch auf die neueren Versuche von Brown (434, 449, 455) an Selenkristallen von 1 bis 1,5 cm Länge hingewiesen. Es ergab sich, daß der Lichteffekt nicht an die belichtete Stelle gebunden ist, sondern sich auf den ganzen Kristall, ja sogar auf andere angewachsene und gegen Licht geschützte Kristalle ausdehnt.

Da somit das Licht in das Innere des Selens tiefer eindringt als man erwarten sollte, so muß die Dicke der Selenschicht und im Zusammenhang damit auch die Intensität des Lichtes von wesentlichem Einfluß auf die Trägheitserscheinungen sein.

Nach Hesehus (229) gleichen die Trägheitskurven vollständig den Kurven der elastischen Nachwirkung, die man bei der Ausdehnung von Gummifäden erhält. Wenn wir nun das Gleichnis (S. 132), daß das Selen nach der Bestrahlung etwas Licht zurückbehält, wieder anwenden, so scheinen die Vorgänge in der Selenmasse bei Verdunkelung sich so abzuspielen, als ziehe sich das Licht aus den tieferen Schichten gegen die Oberfläche in der gleichen Weise zurück wie Gummifäden nach der Ausdehnung sich zusammenziehen.

4. Abhängigkeit der Trägheit von der Vorbelichtung.

Daß Vorbelichtung die Trägheit beträchtlich herabsetzt, ist schon an verschiedenen Stellen erwähnt worden. So nimmt die Trägheit bei intermittierender Beleuchtung schon nach wenigen Intermittenzen einen konstanten Wert an (S. 133). Ferner hat Glatzel mit der S. 139 beschriebenen Zellenanordnung festgestellt, daß durch Vorbelichtung der Selenschicht, gleichgültig ob sie von vorn oder von der Rückseite erfolgte, die Lichtempfindlichkeit und Trägheit herabgesetzt wurde und zwar in besonderem Maße die Verdunkelungsträgheit. Diese Tatsache ist für die Elektrotechnik besonders wichtig, weil gerade das starke Nachkriechen der Zellen nach der Verdunkelung recht störend wirkt.

Fig. 117 zeigt zwei von Glatzel (375) oszillographisch erhaltene Trägheitskurven einer Zelle ohne und mit Vorbelichtung. Die Kurven sind so aufgenommen, daß der Maximalausschlag in beiden Fällen der gleiche war. Wir sehen, daß bei Vorbelichtung der Zelle gerade die Trägheit nach der Bestrahlung wesentlich geringer war.

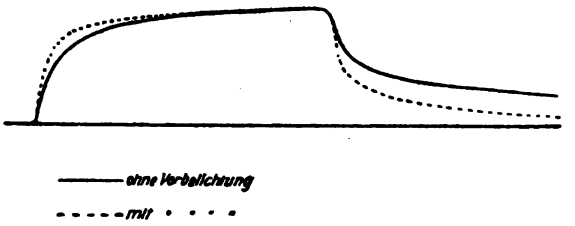


Fig. 117.

Von mir (427) wurde der Einfluß der Vorbelichtung auf eine harte und eine sehr weiche Zelle in der Weise untersucht, daß die Zellen dreimal in Zwischenräumen von 50 Minuten einer konstanten Lichtquelle je 3 Minuten ausgesetzt wurden. Die Zellen hatten vor dem 1. Versuch sechs Monate im Dunkeln ausgeruht. Die Leitfähigkeitsänderungen, berechnet in Prozenten des Dunkelwertes, sind aus den Kurven in Fig. 118 für die harte, in Fig. 119 für eine Zelle mit Ermüdung zu ersehen. Man erkennt ohne weiteres, daß die Trägheit zugleich

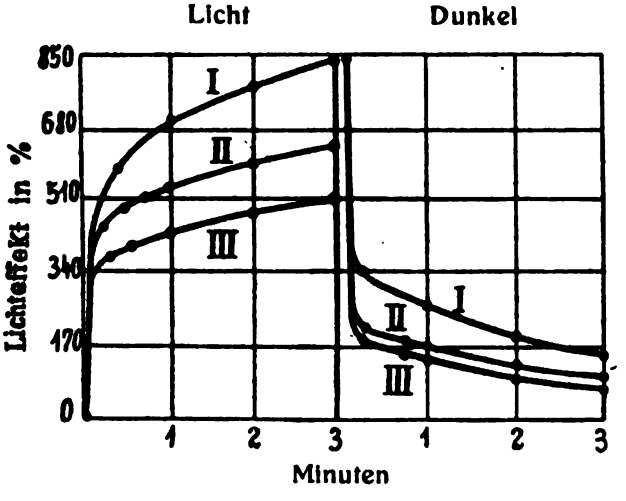


Fig. 118.

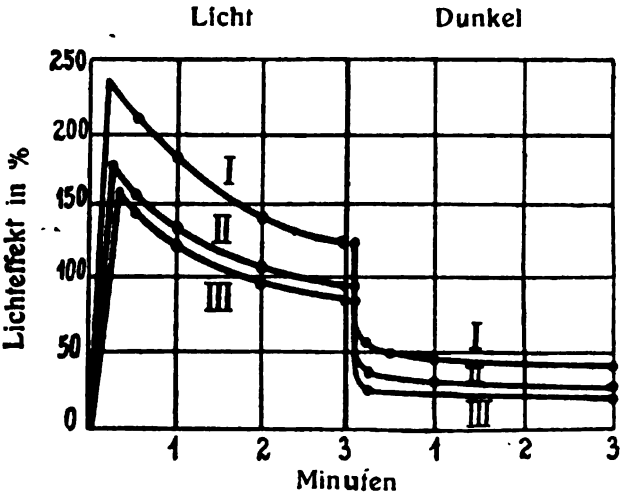


Fig. 119.

mit der Lichtempfindlichkeit von Versuch zu Versuch abnimmt. Die Kurven II und III zeigen schon nahezu den gleichen Verlauf, insbesondere die Erholungskurven, so daß die Trägheit offenbar schon nach wenigen Vorbelichtungen einen konstanten Wert annimmt.

Natürlich wäre die Annahme, daß man durch Steigerung der Dauer und Stärke der Vorbelichtung die Trägheit beliebig herabsetzen kann, vollständig verfehlt, vielmehr ist die Wirkung gerade bei schwacher Vorbelichtung am größten; starke Vorbelichtungen haben einen zu großen Empfindlichkeitsverlust der Zelle im Gefolge.

Über Vorbelichtung vergl. auch S. 110, insbesondere die Versuche von Nicholson (424).

5. Abhängigkeit der Trägheit von der Farbe des Lichtes.

Nach Pfund (336), Dowell (329) und Nicholson (424) wächst die Trägheit zugleich mit der Wellenlänge, sie ist also für rotes Licht größer als für blaues. Pfund beobachtete, daß das Empfindlichkeitsmaximum an Zellen mit Ermüdung im blauen Lichte schneller erreicht wurde als im roten. Nicholson fand für ultrarote Strahlen besonders hohe Trägheit (S. 112). Nach Glatzel (354 und 394) ist zwar die Trägheit im grüngelben Teil des Spektrums geringer als im roten, für gleiche Lichtwirkungen aber ist die Trägheit unabhängig von der Wellenlänge des Lichtes.

6. Abhängigkeit der Trägheit von der Reinheit des Selens und der Natur der Elektroden.

Nach Korn (333) erhält man mit reinem Selen und Platinelektroden möglichst trägheitsfreie Zellen, während Präparate mit Selenidbildung größere Trägheit aufweisen. Fig. 120 zeigt

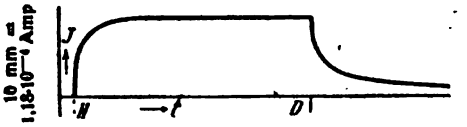


Fig. 120.

die Trägheitskurve, wie sie Glatzel (272, 354) an einem Präparat mit Platinelektroden erhalten hat; Fig. 121 dagegen bezieht

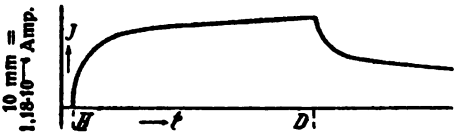


Fig. 121.

sich auf die in gleicher Weise angestellten Versuche an einer Zelle mit Kupferelektroden. Da die Herstellung der beiden Zellen, die von verschiedenen Firmen stammten, sicherlich recht verschieden war, so dürften die Unterschiede in den Trägheitserscheinungen auch noch andere Ursachen haben. In einem gewissen Gegensatz zu den Behauptungen von Korn und Glatzel steht die Beobachtung von Marc (282), daß bestimmte Metallzusätze zu ganz reinem Selen (S. 32) die Erreichung des Gleichgewichtszustandes beschleunigen und somit die Trägheit herabsetzen.

7. Abhängigkeit der Trägheit von der Spannung.

Da mit Vergrößerung der Spannung die Leitfähigkeit und Lichtempfindlichkeit des Selens abnimmt, so war vorauszusehen, daß auch die Trägheitserscheinungen mit der Spannung veränderlich sind. Glatzel (394) kam bei seinen Versuchen zu einem negativen Resultat, da er sich auf den sehr kleinen Spannungsbereich von 10—20 Volt beschränkte. Dagegen habe ich (384) die für technische Zwecke sehr wichtige Beobachtung gemacht, daß bei Vergrößerung der

Spannung die Trägheit zugleich mit der Lichtempfindlichkeit abnimmt und daß die Abnahme der Trägheit verhältnismäßig größer ist als die der Empfindlichkeit. Zu den Versuchen wurden die 2 Zellen verwendet, an denen der Einfluß der Vorbelichtung (S. 141) auf die Trägheitserscheinungen tags zuvor studiert worden war. Lichtintensität und Versuchsbedingungen blieben dieselben. Zuerst wurden 4 Volt an jede Zelle angelegt und drei Minuten lang belichtet. Nach einer Pause von 50 Minuten wurden die Versuche bei 110 Volt Spannung wiederholt. Die Kurven in Fig. 122 wurden mit der harten

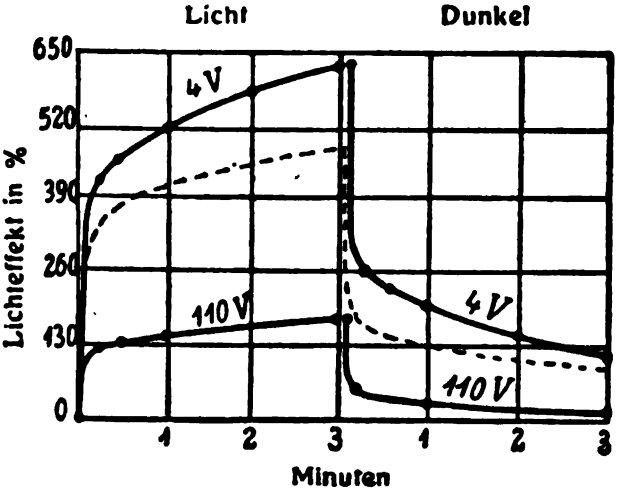


Fig. 122.

Zelle, die Kurven in Fig. 123 mit der weichen gewonnen. Bei 4 Volt Spannung erhielt ich die gleiche Kurvenform wie tags zuvor bei den Versuchen über die Vorbelichtung, die auch bei 4 Volt ausgeführt worden waren. Bei 110 Volt Spannung dagegen war nicht bloß die Lichtempfindlichkeit, sondern auch die Trägheit beträchtlich herabgesetzt. Da ein Teil des Verlustes an Empfindlichkeit und Trägheit, wie er bei 110 Volt festgestellt wurde, durch die Vorbelichtung verursacht ist, wurde die beim 2. Versuch tags zuvor erhaltene Kurve punktiert eingezeichnet. Man darf aber annehmen, daß nunmehr der Einfluß der Vorbelichtung wesentlich geringer war als tags zuvor an der 6 Monate ausgeruhten Zelle; denn es betrug schon bei 4 Volt der Effekt nur mehr ca. 80 % von dem tags zuvor erhaltenen. Aber auch wenn wir der Vorbelichtung noch den gleichen Anteil zusprechen, ist der Einfluß der Spannung auf Lichtempfindlichkeit und Trägheit noch

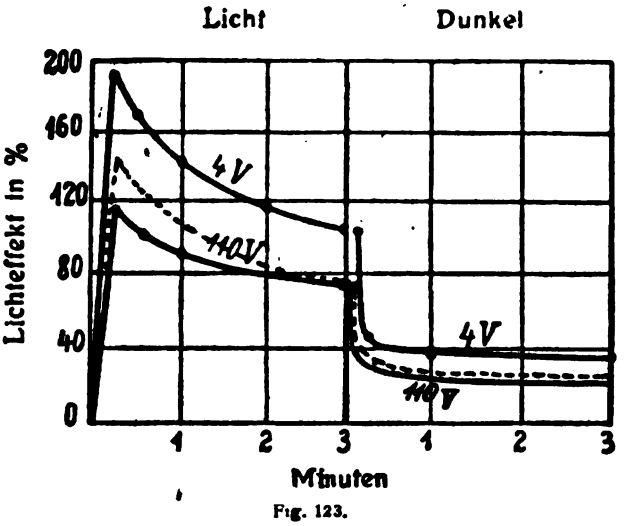


Fig. 123.

sehr beträchtlich. In vielen Fällen freilich werden wir auf den günstigen Einfluß hoher Spannungen verzichten müssen, um die Zellen nicht zu stark zu belasten und die Empfindlichkeit besser ausnützen zu können.

Auch der Spannungseffekt ist an den Trägheitserscheinungen beteiligt. Vergrößert man an einer im Dunkeln liegenden Zelle plötzlich die Spannung, so wächst bekanntlich ihre Leitfähigkeit; die Zelle nimmt aber die der höheren Spannung entsprechende Leitfähigkeit nicht augenblicklich, sondern erst allmählich an, welchen Vorgang ich Dunkelträgheit genannt habe. Diese Tatsache muß bei dem Lichteffekt zur Geltung kommen. Bei Bestrahlung wird die Leitfähigkeit des Selens und somit die Stromstärke plötzlich stark erhöht, wie wenn die Spannung beträchtlich vermehrt worden wäre. Das Selen wird daher die der höheren Stromstärke entsprechende Leitfähigkeit nur allmählich annehmen wie bei einer Erhöhung der Spannung. Der größere Teil der allmählichen Änderungen bei dauernder Bestrahlung kommt jedoch der bereits beschriebenen Tiefenwirkung zu.

8. Abhängigkeit der Trägheit von der Temperatur.

Nach Dowell (352) nimmt bei Temperaturerhöhung sowohl die Belichtungs- als auch die Verdunkelungsträgheit ab. Bei niedrigeren Temperaturen ändert sich der Widerstand des belichteten Selens langsamer als bei gewöhnlicher, die endgültige Widerstandsänderung aber ist wesentlich größer. Ebenso vollzieht sich die Erholung bei niedrigen Temperaturen merklich langsamer als bei höheren. Glatzel (394) fand

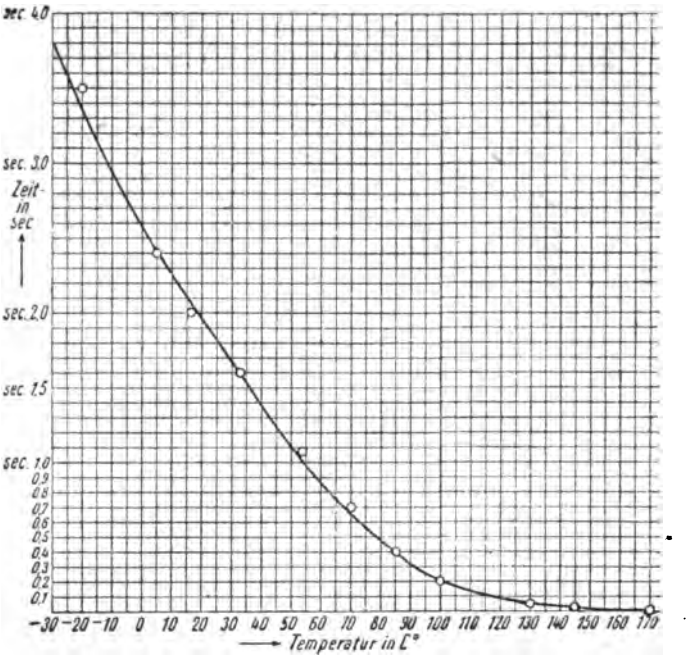


Fig. 124.

bei Erniedrigung der Temperatur von 0 bis — 70 ° ein beträchtliches Ansteigen der Empfindlichkeit, gleichzeitig aber auch eine bedeutende Zunahme der Trägheit. An Zellen mit Ermüdung beobachtete Sperling (292), daß die zur Erreichung des Maximums der Leitfähigkeit erforderliche Zeit mit Temperaturzunahme beständig abnimmt. Die Reaktionsgeschwindigkeit ergibt sich aus Fig. 124, in der auf der Abszissenachse die Temperaturen, auf der Ordientenachse die zur Erreichung des Maximums nötigen Zeiten aufgetragen sind. Während bei — 20 ° der Anstieg bis zum Höchstwert 3,5 Sekunden beansprucht, ist bei + 170 ° das Maximum schon nach 0,0136 Sekunden erreicht. Die Ermüdung bezw. der Schatteneffekt nimmt bei Temperaturerhöhung immer mehr ab, um in der Gegend von 170 ° ganz zu verschwinden, während die Empfindlichkeit bei ca. 200 ° gleich Null wird.

Das Studium der Trägheitserscheinungen zeigt uns Mittel und Wege, die störende Eigenschaft der Trägheit herabzusetzen. Dieselben reichen aber für technische Zwecke meist nicht aus und man hat daher versucht. die Trägheit des Selens durch verschiedenartige Schaltungen der Zellen und Konstruktion entsprechender Relais auf ein Minimum zu reduzieren. Die auf diesem Gebiete geleisteten bedeutenden Arbeiten wollen wir im Abschnitt B S. 220 gesondert behandeln.

X. Der Einfluß von Verunreinigungen und Feuchtigkeit auf die Lichtempfindlichkeit des Selens.

Im Abschnitt II haben wir bereits den Einfluß der Verunreinigungen und der Feuchtigkeit auf die Leitfähigkeit des Selens ausführlich behandelt. Da der Widerstand des trockenen Selens sehr hoch ist, müssen natürlich alle leitenden Verunreinigungen, also die Metallbeimengungen, den Widerstand des Selens herabsetzen. Zur Herstellung von Selenzellen verwendet man chemisch reines Selen, setzt demselben aber gerne eine bestimmte Menge eines edleren Metalles, am besten 0,01—0,1 % Silber bei, weil dadurch das Präparat rascher einen konstanten Widerstand annimmt (Marc 282).

Bidwell (84, 123) kam zu der Anschauung, daß kleine Metallzusätze nicht bloß die Leitfähigkeit, sondern auch die Lichtempfindlichkeit des Selens bedeutend erhöhen. Lichtempfindliche Zellen kann man nach seiner Meinung nur mit Elektroden erhalten, welche Selenide zu bilden imstande sind. Bidwell sucht also die Ursache der Lichtempfindlichkeit in den Metallbeimengungen des Selens. Daß diese Anschauung Bidwells irrig war, wurde bereits S. 66 auseinandergesetzt. Vielmehr wurde durch spätere Arbeiten nachgewiesen, daß die Lichtempfindlichkeit eine spezifische Eigenschaft des Selens selbst ist (Berndt 201, 202; Pfund 215) und sogar durch Verunreinigungen beträchtlich herabgesetzt wird (Uljanin 98, Marc 282, Sperling 292, Amaduzzi und Padoa 389). Nach den beiden letzten Forschern nimmt die Lichtempfindlichkeit einer Mischung von Selen und Schwefel mit Zunahme des Schwefelgehaltes beständig ab.

Von ganz besonderem Einfluß auf Leitfähigkeit und Lichtempfindlichkeit des Selens ist die Feuchtigkeit. Erhitzt man feuchtes amorphes Selen langsam von Zimmertemperatur bis zum Schmelzpunkt, so findet, wie schon früher (S. 31) ausführlich auseinander gesetzt wurde, bei 110—130° und 200—210° eine Feuchtigkeitsabgabe statt. Hält man die Temperatur innerhalb dieser Temperaturbereiche konstant, so nimmt die elektrische Leitfähigkeit des Präparates erst rasch, dann immer langsamer bis zu einem Maximum ab. Zeigt ein auf 210° erhöhtes Präparat keine Leitfähigkeitszunahme mehr, so darf man wohl annehmen, daß die Abgabe der Feuchtigkeit ziemlich vollständig erfolgt ist.

Es entsteht nun die Frage, ob trockenes kristallinisches Selen bei Zimmertemperatur Feuchtigkeit in größerer Menge

aufnehmen kann, also hygroskopisch ist. Die Ansichten hierüber waren geteilt. Während Bidwell und Bronk das Selen für hygroskopisch erklärten, kam Giltay bezw. Ruyven zu dem entgegengesetzten Resultat. Durch meine (315, 383) Versuche wurde die Frage dahin entschieden, daß beide Parteien recht haben, indem das Selen je nach der Herstellung hygroskopisch sein kann oder auch nicht. Hygroskopische Präparate erhielt ich durch Kristallisieren des Selens aus dem Schmelzfluß und äußerst langsame Kühlung; die Kristallisation des geschmolzenen Selens wurde durch 4 Stunden langes Erhitzen auf 200—210° erzielt. In einzelnen Fällen bekam ich auch hygroskopische Zellen durch langsames Erhitzen des amorphen festen Selens von Zimmertemperatur bis kurz vor den Schmelzpunkt, langes Konstanthalten dieser hohen Temperatur und recht langsame Kühlung. Dagegen wiesen alle Präparate, die aus dem amorphen festen Zustand durch Erhitzung auf ca. 200° und äußerst rasche Kühlung erhalten worden waren, keine hygroskopischen Eigenschaften auf. Besonders die Art der Kühlung zeigte sich von großem Einflusse auf das Verhalten der Zellen. Das zu den Versuchen verwendete Selen war chemisch rein und vollkommen trocken. Da die hygroskopischen Zellen viele merkwürdige Eigenschaften aufweisen, die man an einer normalen Zelle nicht beobachten kann, habe ich sie anomale Präparate genannt.

Die anomalen Präparate besaßen kurz nach der Herstellung ungefähr denselben Widerstand wie die normalen; dagegen waren sie polarisierbar, während normale Zellen keine oder nur ganz schwache Polarisation aufweisen. Bei den normalen Zellen fällt bekanntlich in den ersten Tagen nach der Herstellung die Dunkelleitfähigkeit erst rasch, dann langsamer gegen einen annähernd konstanten Dunkelwert ab. Ganz anders verhielten sich die anomalen Präparate; an ihnen konnte ich von Tag zu Tag eine auffallende Vergrößerung der Dunkelleitfähigkeit beobachten; gleichzeitig damit wuchs die Polarisierbarkeit. Erst nach ungefähr einer Woche traten unregelmäßige Schwankungen in beiden Richtungen auf. Ein Vergleich der Schwankungen der Dunkelleitfähigkeit einer anomalen Selenzelle mit den Änderungen der Luftfeuchtigkeit innerhalb 4 Wochen ergab eine recht gute Übereinstimmung. Für die ersten 13 Tage sind diese Änderungen in Fig. 125 graphisch dargestellt; die punktierte Kurve gibt die Schwankungen der Luftfeuchtigkeit an. Aus nachfolgender Tabelle sind die Änderungen von Luftfeuchtigkeit, Leitfähigkeit und Temperatur für dieselbe Zeit zu ersehen.

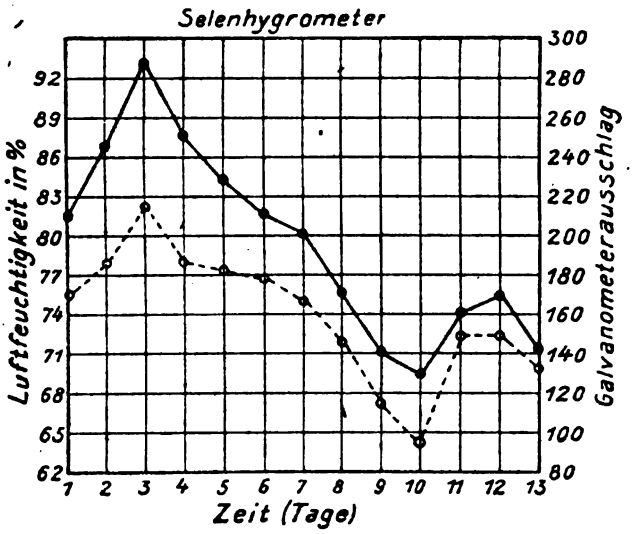


Fig. 125.

Tag	Temperatur	Luftfeuchtigkeit	Galvanometerausschlag
1.	$8^3/_4{}^0$ C	77,5 Proz.	210
2.	$8^3/_4$	78	246
3.	$8^3/_4$	82,5	289
4.	8	78	251
5.	$7^1/_4$	77,5	228
6.	$8^1/_2$	76,5	212
7.	8	75	200
8.	$7^1/_4$	72	168
9.	$8^1/_4$	67	140
10.	$8^1/_4$	64	133
11.	$7^3/_4$	72,5	160
12.	$7^3/_4$	72,5	173
13.	$7^1/_4$	70	144

Meine anomalen Zellen besaßen einen negativen Temperaturkoeffizienten des Widerstandes (wenigstens in der Nähe der Zimmertemperatur), Erwärmung bewirkte also eine Leitfähigkeitszunahme. Da die Zellen ziemlich stark auf Wärmewirkungen reagieren, so wäre bei größeren Temperaturunterschieden ein Vergleich wohl unmöglich geworden. Es wurde jedoch ein nie geheiztes Zimmer gefunden, dessen Temperatur,

trotzdem die Ventilation dauernd geöffnet war, innerhalb Wochen nahezu konstant blieb. Hygrometer und ein Kästchen mit der Selenzelle waren nebeneinander aufgehängt. Das Selenpräparat war wohl von den Einflüssen des Lichtes, nicht aber der Luft geschützt. Die Temperatur wurde gemessen an zwei gut übereinstimmenden Thermometern, von denen das eine am Hygrometer befestigt war, während das andere mit seiner Skala zum Teil aus dem Kästchen herausragte. Der Temperaturunterschied betrug innerhalb der angegebenen Zeit nur $1\frac{1}{2}^0$ C. Der Einfluß des Temperaturwechsels ist aus der Tabelle leicht zu ersehen; so wäre am 8. und 13. Tage bei höherer Temperatur der Ausschlag wohl etwas größer gewesen. Daß aber der Temperaturwechsel nicht allein die Ursache der Schwankungen des Dunkelwertes ist, ergibt sich nicht bloß aus dem gleichen Verlauf der beiden Kurven, sondern auch daraus, daß innerhalb der ersten drei Tage bei gleicher Temperatur der Ausschlag zugleich mit der Luftfeuchtigkeit wuchs, vom 5. bis zum 6. Tage und vom 8. bis zum 9. Tage der Ausschlag trotz Temperaturzunahme fiel, vom 10. bis zum 11. Tage aber trotz Temperaturabnahme stieg. Bemerkenswert ist das verhältnismäßig langsame Anwachsen der Leitfähigkeit am 11. Tage; läßt man aber den 11. Tag unberücksichtigt, so findet man, daß das Ansteigen der zwei Kurven vom 10. bis zum 12. Tage nahezu parallel geht. Daraus ergibt sich, daß das Selen auf die Luftfeuchtigkeit verhältnismäßig langsam reagiert. Dieses Nachhinken der Feuchtigkeitsaufnahme hat sich auch an anderen Stellen, insbesondere auch beim Abfallen der Kurven gezeigt. Ferner ist zu erwähnen, daß die Unterschiede in der Leitfähigkeit bei größerer Luftfeuchtigkeit weit stärker sind als bei geringerer, also mit Abnahme der Luftfeuchtigkeit stark abnehmen.

Die Übereinstimmung der beiden Kurven ist außerordentlich auffallend, und wenn man noch die kleinen Temperaturschwankungen in Betracht zieht, so muß wohl jeder Zweifel, daß das anomale Selen hygroskopisch ist, völlig aufhören. Einen praktischen Wert wird trotz der hier gefundenen günstigen Resultate das Selenhygrometer nie bekommen, und zwar nicht bloß wegen des starken Temperatureinflusses, sondern insbesondere deshalb, weil der Strom täglich nur einmal auf einige Sekunden geschlossen werden darf. Die Erholungszeit der Zelle ist zu lang. Bei meinen Versuchen wurde jeden Abend 7 Uhr der Ausschlag genau 15 Sekunden nach Stromschluß festgestellt und dann der Strom unterbrochen. Ein längeres oder öfteres Einschalten würde den Dunkelwert immer weiter herabdrücken, so daß die Resultate nicht mehr zu vergleichen wären.

Das Verhalten einer feuchten Zelle bei längerem Stromdurchgang wurde bereits (S. 32) beschrieben. Wir sehen aus

Fig. 13, daß die Stromstärke gleich nach dem Einschalten des Stromes rasch abfällt, um sich langsam einem Minimum zu nähern. Unterbricht man den Strom, so erholt sich die Zelle in einigen Tagen wieder und zeigt bei abermaligem Einschalten der Stromquelle die gleiche Erscheinung wie früher; die Stromstärke ist zu Beginn des Versuches erhöht, um wieder rasch gegen ein Minimum abzufallen. Legt man jetzt eine höhere Spannung an, so tritt ein weiteres Sinken der Leitfähigkeit ein und zwar ist die neue Abnahme um so größer, je höher die Spannung gewählt wurde.

Will man die Abhängigkeit dieser Erscheinung von der Spannung studieren, so empfiehlt es sich nicht, Versuche an demselben Präparat mit verschiedenen Spannungen vorzunehmen. Die Dunkelleitfähigkeit des anomalen Präparates wechselt ja von Tag zu Tag; mit der Höhe der Dunkelleitfähigkeit aber nimmt im allgemeinen auch der Rückgang der Stromstärke während des Versuches zu. Bei den beständigen Schwankungen wird man daher zu Resultaten kommen, die keinen sicheren Schluß zulassen. Davon habe ich mich wiederholt überzeugt. Ich wendete daher folgenden Kunstgriff an. Ein anomales Präparat wurde mit den beiden Polen eines Akkumulators von 2 Volt verbunden. Nach 10 Sekunden betrug die Stromstärke im Dunkeln 220, nach 1 Minute 180, nach 7 Minuten 150. Innerhalb der letzten 3 Minuten war sie nur um 4 gesunken und sie wäre innerhalb der nächsten drei Minuten sicher nur auf 148 zurückgegangen. Nun wurden aber 3 Minuten lang statt der 2 Volt 8 Volt angelegt und als nachher wieder 2 Volt eingeschaltet wurden, betrug die Stromstärke 118. Die Vergrößerung der elektromotorischen Kraft innerhalb 3 Minuten hat also ein ganz beträchtliches Sinken der Leitfähigkeit verursacht, während bei der früheren Stromstärke fast kein Rückgang mehr erfolgte. Dieser tiefe Dunkelwert von 118 konnte sich aber bei 2 Volt Spannung nicht halten. Nach einer Minute betrug die Stromstärke 130 und nach 5 Minuten 134,5. Es trat also eine wesentliche Erholung bezw. Leitfähigkeitszunahme bei der geringeren Stromstärke ein. Nun wurden wieder vier Minuten lang 8 Volt angelegt, und als nachher zwei Volt eingeschaltet wurden, betrug die Leitfähigkeit 112, während sie bei Beibehaltung der Stromstärke sicher noch etwas über 134,5 gestiegen wäre. Es trat also wieder ein beträchtlicher Rückgang infolge der Erhöhung der Stromstärke ein. Bei der nun wieder geringeren Stromstärke konnte sich das Präparat wesentlich erholen, nach 1 Minute betrug die Leitfähigkeit 128, nach 5 Minuten 133. Die Spannung hat also einen wesentlichen Einfluß auf die Erscheinung. Der Einfluß der Spannung äußert sich demnach bei den anomalen Zellen in genau entgegengesetzter

Weise wie bei den normalen; ich habe die Erscheinung daher als anomalen Spannungseffekt bezeichnet.

Wie erklärt sich nun der Rückgang der Leitfähigkeit während des Stromdurchgangs? Daß hier die Polarisation eine Rolle spielt, ist klar; aber sie reicht nicht aus zur Erklärung dieser Erscheinung. Bringt man z. B. eine anomale Zelle, die in der Atmosphäre bei Stromdurchgang deutliche Abnahme der Stromstärke zeigt, in klares Öl, so ist der Rückgang wesentlich geringer. Die Abnahme der Stromstärke bei Versuchen in Öl rührt, wie das Experiment ergab, zum größten Teil von dem Polarisationsstrom her, der den Hauptstrom herabdrückt. Da in der Atmosphäre der Rückgang bedeutend stärker ist, muß die Ölschicht einen sonst sich vollziehenden Prozeß beeinträchtigen.

Hat man durch längeren Stromdurchgang die Leitfähigkeit eines Präparates erheblich herabgesetzt, so erholt sich dieselbe in der atmosphärischen Luft nur langsam. Nimmt man das ganze Experiment aber im Ölbad vor, so geht die Erholung viel rascher vor sich. Demnach scheint mir beim Stromdurchgang in der Atmosphäre an den Stellen größter Stromdichte eine Feuchtigkeitsabgabe stattzufinden, welche ein Sinken der Stromstärke bewirkt. während im Ölbad, das die rasche Abgabe der Feuchtigkeit verhindert, nur eine geringe Verdrängung derselben eintritt. Bei der Erholung wird dann das Präparat in dem einen Falle die Feuchtigkeit aus der Atmosphäre erst wieder langsam gewinnen müssen, während sie im anderen Falle schon in genügender Menge in der nächsten Nähe vorhanden ist.

Wir dürfen daher annehmen, daß die bei längerem Stromdurchgang auftretende Abnahme der Stromstärke teilweise auf Polarisation, teilweise auf Feuchtigkeitsabgabe beruht.

Daß die atmosphärische Luft die alleinige Ursache der anomalen Vorgänge im Selen ist, bestätigt aufs deutlichste folgender Versuch: Eine Zelle, welche alle Eigenschaften eines anomalen Präparates besaß, wurde eine Stunde lang durch einen trockenen Luftstrom getrocknet und dann in ein Glasgefäß eingeschlossen, das auf 50 mm evakuiert wurde. Die Zelle zeigte sich nun trotz des Stromdurchganges normal; sie war nur mehr ganz schwach polarisierbar, ihre Leitfähigkeit sank nicht mehr bei längerem Stromdurchgang, auch bewirkte eine Erhöhung der Spannung eher eine Zunahme als eine Abnahme der Leitfähigkeit. Hierauf brachte ich die Zelle wieder ins Freie; bei der eben herrschenden großen Luftfeuchtigkeit hatte sie schon nach wenigen Tagen ihre anomalen Eigenschaften wieder erlangt.

Schließlich gelang es mir noch an hygroskopischen Präparaten, die in der atmosphärischen Luft die Eigenschaften der anomalen Zellen nur schwach zeigten, durch Einbringen in feuchte Luft alle anomalen Vorgänge in deutlicher Weise hervorzurufen. Ein solches anomales Präparat wurde zugleich mit einem normalen in einem Kasten aufgehängt, in den durch eine kurze Röhre die Dämpfe von 1/4 l Wasser von 28° geleitet wurden. Dabei kühlte sich die Flüssigkeit allmählich auf 15° ab. Nach 1 Stunde wurden die 2 Präparate herausgenommen, 1/4 Stunde im Freien aufbewahrt und dann geprüft. Die Leitfähigkeit des anomalen war nun 17 mal so groß als vor dem Einbringen in die Kammer, während die des normalen nur um $^1/_{10}$ gewachsen war. Als dieser Versuch an zwei anderen Zellen mit Wasser von 32° wiederholt wurde, war die Leitfähigkeit des anomalen auf das 100-fache, die des normalen auf das Doppelte angestiegen. An einem anomalen Präparat konnte ich einmal die Beobachtung machen, daß die Leitfähigkeit einige Minuten nach dem Herausnehmen aus der Kammer noch langsam fast auf den doppelten Wert anwuchs, während dieselbe sonst immer sofort mit der Herausnahme zurückging. Vielleicht hatte sich in dem einen Falle an der Oberfläche des Präparates etwas Wasserdampf niedergeschlagen, der erst noch ganz vom Präparat aufgenommen wurde. Bei allen Versuchen dieser Art wurde der Strom nur so lange eingeschaltet, als zur Messung nötig war. In der atmosphärischen Luft ging die Leitfähigkeit der auf diese Weise behandelten anomalen Präparate in 2—3 Tagen ungefähr auf den früheren Wert zurück, bei den normalen dauerte dies kaum eine Stunde. Bei den anomalen Zellen stieg die Leitfähigkeit bloß unter der Einwirkung von Luftfeuchtigkeit oft auf den dreifachen Wert an, während an normalen Zellen eine Änderung nicht mit Sicherheit festgestellt werden konnte, da auch der Temperaturwechsel mitwirkte. Der Versuch zeigt recht deutlich, daß die eine Art von Selenpräparaten außerordentlich stark hygroskopisch ist, während die andere kaum eine Spur von hygroskopischen Eigenschaften besitzt.

Da hygroskopische Präparate stark polarisierbar sind, besitzen sie je nach der Stromrichtung verschiedenen Widerstand, sie zeigen unipolare Leitung, während bei normalen Zellen der Widerstand in jeder Richtung gleich ist. Durch Austrocknen der Präparate wird ihre Leitfähigkeit verringert und die unipolare Leitung verschwindet zugleich mit der Polarisierbarkeit fast vollständig.

Sehr interessant ist das Verhalten der hygroskopischen Präparate bei Bestrahlung. Belichtet man ein Präparat sofort nach dem Einschalten des Stromes, so nimmt die Stromstärke meistens mit dem Auffallen der Lichtstrahlen momentan zu,

fällt dann rasch gegen den Dunkelwert ab und geht schließlich unter denselben herab, um sich allmählich einem Minimum zu nähern; bei der darauffolgenden Verdunkelung nimmt die Stromstärke erst rasch, dann nur mehr ganz langsam ab oder in manchen Fällen auch wieder etwas zu. Die Änderungen der Stromstärke derartiger Zellen werden durch die Kurve IV in Fig. 126 wiedergegeben. Die momentane Zu-

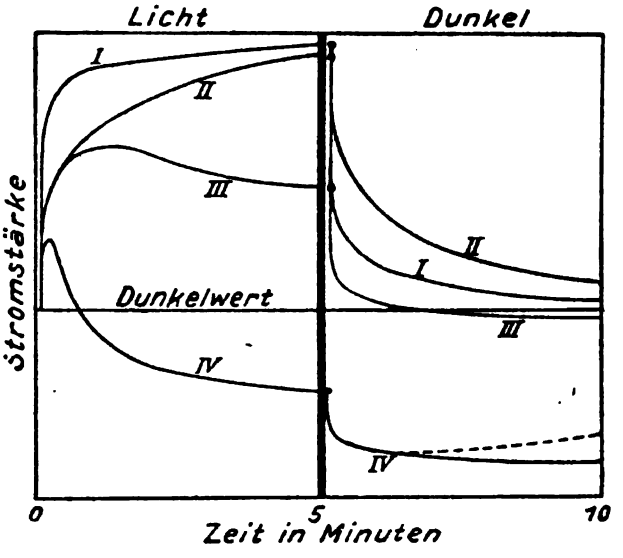


Fig. 126.

nahme der Stromstärke mit dem Auffallen der Lichtstrahlen kann sehr gering, ja sogar gleich Null sein, so daß nur eine Abnahme der Stromstärke eintritt. Diese Erscheinung beobachtet man hauptsächlich an Zellen, die besonders viel Feuchtigkeit aufgenommen haben und nur geringe Lichtempfindlichkeit besitzen. Präparate, die nur wenig hygroskopisch sind, verhalten sich ähnlich wie normale Zellen, die starke Ermüdung bei Belichtung zeigen; nur fällt nach der Abdunkelung die Stromstärke unter den ursprünglichen Dunkelwert herab, wie es Kurve III zeigt. Dagegen bleibt bei den normalen Zellen die Leitfähigkeit nach der Abdunkelung stets größer als der Dunkelwert, nähert sich aber letzterem allmählich immer mehr. Die Kurven I und II veranschaulichen das bekannte Verhalten der weichen und harten Zellen.

Da die Größe der bei Belichtung auftretenden Leitfähigkeitsabnahme von Zeit zu Zeit in der gleichen Weise wechselte wie die Stromstärke im Dunkeln, die Polarisierbarkeit und Abnahme der Stromstärke bei längerem Stromdurchgang, so

lag der Schluß nahe, daß alle diese Erscheinungen die gleiche Ursache haben und daß also die Abnahme der Leitfähigkeit bei Belichtung hygroskopischer Zellen ebenfalls dem Einflusse der Feuchtigkeit zuzuschreiben ist. Die genannten Erscheinungen halten insbesondere in den ersten Tagen nach der Herstellung der Zelle, woselbst sich die bedeutendsten Änderungen vollziehen, gleichen Schritt mit einander. Am Tage der Herstellung ist die Leitfähigkeit klein, die Polarisierbarkeit gering, die Lichtempfindlichkeit gut. In den folgenden Tagen nehmen Leitfähigkeit und Polarisierbarkeit bedeutend zu, die Lichtempfindlichkeit dagegen verschwindet allmählich und macht einer Leitfähigkeitsabnahme bei Belichtung Platz. Ich habe hierüber sehr eingehende Versuche angestellt, da einige Forscher ähnliche Erscheinungen beobachtet haben und deren Ursache in dem Selen selbst suchen.

Zuerst wurde untersucht, ob ein Unterschied in der Änderung der Stromstärke bei einem hygroskopischen Präparat auftritt, wenn während der Belichtung der Strom a) geschlossen, b) unterbrochen ist. Ein solcher Unterschied mußte erwartet werden, da ja bekanntlich der Dunkelstrom kurz nach dem Einschalten erst rasch, dann langsamer gegen ein Minimum abfällt. Um die entsprechenden Werte für den Fall, daß der Strom ausgeschaltet ist, zum Vergleich zu erhalten, wurde der Strom dreimal einige Sekunden eingeschaltet und zwar wurde der Ausschlag 1) im Dunkeln und am Anfang der Belichtung, 2) am Ende der Belichtung und am Anfang der Verdunkelung, 3) am Ende der Beobachtung festgestellt. Da bei einem besonders gut wirksamen Präparat infolge der ersten zwei wenn auch nur kurzen Stromdurchgänge schon ein beträchtlicher Rückgang des Dunkelwertes erfolgt, wurden zu den Versuchen Zellen verwendet, die weniger stark reagieren. Aus Fig. 127 sind die Änderungen der Stromstärke

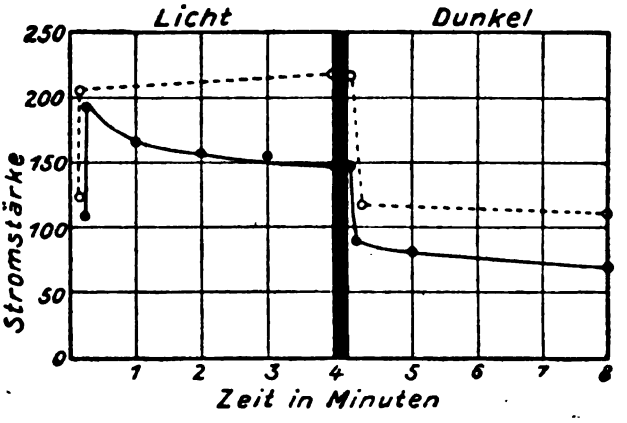


Fig. 127.

mit und ohne Stromdurchgang ersichtlich. Die punktierte Kurve gibt den Verlauf bei unterbrochenem Strom an; man sieht, daß das Verhalten normal ist. Daß die Trägheit geringer ist als bei normalen Zellen, erklärt sich durch die bei dem zweimaligen Einschalten des Stromes eintretenden Störungen. War der Strom beständig geschlossen, so zeigte die Zelle, wie aus der anderen Kurve ersichtlich ist, anomales Verhalten.

Stark hygroskopische Zellen, bei denen die Stromstärke schon nach wenigen Sekunden unter den Dunkelwert herabgeht, wiesen stets eine bedeutende Zunahme der Leitfähigkeit auf, wenn der Strom erst einige Minuten nach dem Beginn der Belichtung eingeschaltet wurde. Mit dem Moment des Einschaltens aber begann eine sehr rasche Abnahme der Stromstärke. Aus diesen und ähnlichen Versuchen ergab sich zweifellos, daß die Abnahme der Stromstärke in den anomalen Zellen nicht durch das Licht, sondern durch den Stromdurchgang selbst verursacht wurde. Bei den normalen Zellen dagegen ist der Strom ohne Einfluß auf die Leitfähigkeitsänderungen im Lichte.

Wenn nun das Verhalten der anomalen Selenzellen durch den Stromdurchgang verursacht wird, so muß eine vorhergehende Polarisation auf den Verlauf der Erscheinung bei Belichtung von ganz besonderem Einfluße sein. Um darüber Klarheit zu erhalten, wurden an mehreren Zellen je drei Versuche folgender Art ausgeführt.

Versuch I: Eine normale Zelle, die zuerst einige Minuten kurz geschlossen war, wurde in den Stromkreis eingeschaltet und sofort drei Minuten belichtet. Sie zeigte zuerst Zunahme, dann Abnahme der Stromstärke unter den Dunkelwert, wie es aus Kurve I in Fig. 128 ersichtlich ist.

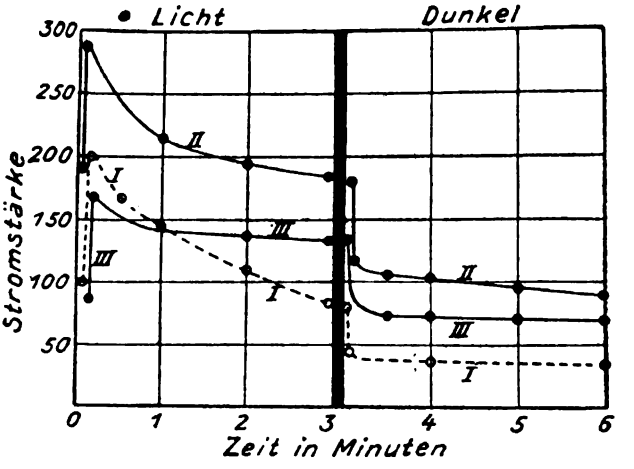


Fig. 128.

Versuch II: Am folgenden Tage war der Dunkelwert der Leitfähigkeit etwas größer; das Präparat wurde wieder einige Minuten kurz geschlossen. Vor der Belichtung war diesmal der Strom fünf Minuten lang in entgegengesetzter Richtung durch das Präparat gesendet worden, so daß der dadurch erzeugte Polarisationsstrom mit dem nachfolgenden Strome gleichgerichtet war, ihn also verstärkte. Bei Bestrahlung, die sofort nach der Stromwendung erfolgte, stieg die Stromstärke erst an und fiel dann rasch ab und zwar in der ersten Minute viel stärker als beim Versuch I infolge des raschen Verschwindens des erzeugten Polarisationsstromes (Kurve II). Die Zunahme der Stromstärke bei Beginn der Bestrahlung war in einigen Fällen kaum mehr zu beobachten.

Versuch III: Am dritten Tage war die Leitfähigkeit nur wenig größer als am ersten. Das Präparat wurde zuerst wieder kurz geschlossen und dann in den Stromkreis eingeschaltet. Als die Stromstärke nach fünf Minuten sich einem Minimum genähert hatte, erfolgte die Belichtung. Das Präparat zeigte jetzt nur mehr die Ermüdung, die Stromstärke fiel erst bei der Abdunkelung unter den Dunkelwert, wie aus Kurve III ersichtlich ist. Schaltet man also das anomale Präparat vor der Belichtung zuerst längere Zeit in den Stromkreis ein, so kommt die Leitfähigkeitsvergrößerung im Lichte deutlich zum Ausdruck, und zwar um so mehr, je länger das Präparat vorher eingeschaltet blieb. Dies bewiesen auch die vier folgenden Versuche.

Eine anomale Zelle wurde sofort nach dem Einschalten in den Stromkreis drei Minuten lang schwachem Lichte ausgesetzt. Sie zeigte sehr starke Ermüdung, wie aus Kurve I in Fig. 129 ersichtlich ist. Als sie aber nach einigen Tagen zuerst 40 Minuten eingeschaltet blieb, während welcher Zeit die Stromstärke von 200 auf 130 herabgedrückt wurde, verhielt sie sich bei Belichtung ganz normal (Kurve I'). Drei Minuten nach der Abdunkelung war der ursprüngliche Dunkelwert noch lange nicht erreicht. Nach mehreren Tagen wurde dieselbe Zelle bei noch schwächerer Belichtung sofort nach dem Einschalten drei Minuten exponiert. Das Präparat war stark anomal, wie Kurve II zeigt. Als es aber nach drei Tagen zuerst 30 Minuten eingeschaltet blieb, verhielt es sich normal (Kurve II').

Da die Spannung auf die Leitfähigkeit in einem hygroskopischen Präparat von besonderem Einfluß ist (anomaler Spannungseffekt S. 152), war vorauszusehen, daß auch die Größe der Leitfähigkeitsabnahme bei Belichtung in hohem Maße mit der Spannung variiert. Wurde aber der Strom längere Zeit ohne Unterbrechung im Dunkeln durch das Präparat gesendet, so verhielt sich das sonst anomale Präparat

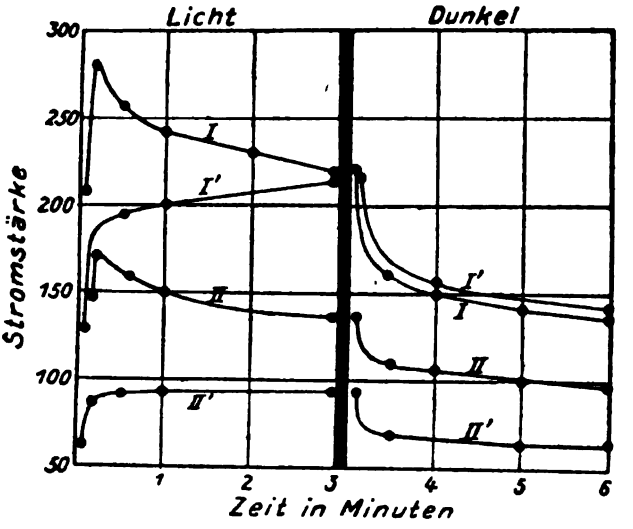


Fig. 129.

bei jeder Spannung vollständig normal; es zeigte Leitfähigkeitszunahme bei Bestrahlung und bei Verdunkelung die bekannte Trägheit.

Ist die Abnahme der Leitfähigkeit kein lichtelektrischer Effekt, sondern nur ein Vorgang, welcher die Leitfähigkeitszunahme des Selens bei Belichtung überdeckt, so wird der wahre (positive) Lichteffekt, der in einer Vergrößerung der

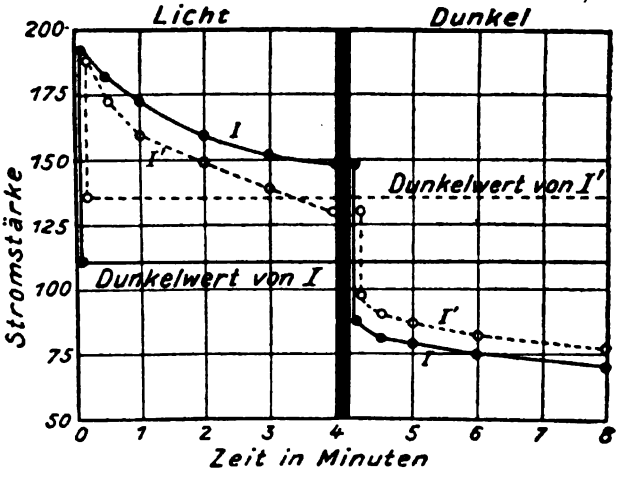


Fig. 130.

Stromstärke besteht, zugleich mit der Lichtintensität wachsen und geringe Lichtintensität die anomalen Vorgänge begünstigen müssen. Die Richtigkeit dieser Schlußfolgerung wurde tatsächlich durch den Versuch bestätigt.

Kurve I in Fig. 130 gibt ein Bild der Stromstärkeänderungen bei stärkerer Lichtintensität, Kurve I' bei geringerer Lichtstärke. Während das Präparat bei kräftiger Bestrahlung nur Ermüdung zeigt, fällt die Stromstärke bei schwacher Belichtung bald unter den Dunkelwert. Die Abnahme der Stromstärke bei der Verdunkelung ist nach starker Belichtung immer größer als nach schwacher, da der Rückgang der durch die vorausgehende Bestrahlung vergrößerten Leitfähigkeit bedeutender ist.

Durch Variieren der Lichtstärke kann man bald Abnahme, bald Zunahme der Stromstärke erzielen. Bei Anwendung großer Lichtintensität wird man an einer Zelle, die etwas anomal ist, aber gute Lichtempfindlichkeit besitzt, keinen auffallenden Rückgang der Stromstärke beobachten können. Der Umstand, daß das anomale Verhalten der Selenzellen mit Vergrößerung der Lichtintensität immer weniger hervortritt, widerspricht der Annahme, daß es sich bei den anomalen Vorgängen in hygroskopischen Zellen um einen lichtelektrischen Effekt handelt.

Ferner wurde die Abhängigkeit des Effektes von der Wellenlänge des Lichtes untersucht. Von Interesse war, ob rotes oder blaues Licht in verschiedener Weise auf den Rückgang der Leitfähigkeit einwirkt. Wäre der Effekt z. B. ein chemischer Vorgang, so würde die Lichtfarbe nicht ohne Einfluß sein. Ich verweise hier auf die lichtelektrischen Erscheinungen an Metallen in Elektrolyten (S. 9), bei denen die Wellenlänge des Lichtes eine ganz besondere Rolle spielt und rotes bezw. blaues Licht recht verschiedenartige Wirkungen hervorruft.

Es kommt bei dieser Untersuchung weniger auf Verwendung von homogenem Lichte an als insbesondere darauf, daß sich die anomalen Eigenschaften der Zellen von Versuch zu Versuch nicht wesentlich ändern. Ich arbeitete daher bloß mit farbigen Gläsern.

Nachdem ich mir rote und blaue Gläser verschafft hatte, die möglichst wenig andersfarbiges Licht durchließen, wurden unter ihnen zwei solche Gläser ausgesucht, daß eine hochempfindliche normale Selenzelle genau die gleiche Leitfähigkeitserhöhung erfuhr, ob das Licht durch die rote oder blaue Platte auf die Zelle fiel. Wäre nun der Rückgang der Leitfähigkeit ein photochemischer Vorgang, so müßte sich ein anomales Präparat hinter dem roten Glas anders verhalten als hinter

dem blauen. Die Untersuchung ergab aber keinen Unterschied im Abfallen der Leitfähigkeit im roten und blauen Licht. Wurden die Zellen gut getrocknet und in ein Ölbad gebracht, so waren sie normal und zeigten im roten und blauen Licht bedeutende Leitfähigkeitszunahme. Es liegt demnach kein photochemischer Vorgang vor, was vorauszusehen war, da ja ein direkter Einfluß des Lichtes auf den Effekt überhaupt nicht existiert.

Durch sorgfältiges Austrocknen von hygroskopischen Präparaten, die alle normalen Eigenschaften in ausgeprägter Weise zeigten und nachheriges Einbringen in ein Ölbad erhielt ich regelmäßig normale Präparate, deren Leitfähigkeit bei Bestrahlung stark anwuchs und nicht mehr unter den Dunkelwert heruntersank. Entzieht man also dem Selen Feuchtigkeit, so steigt die Lichtempfindlichkeit. Ferner gelang es durch Einbringen von Präparaten, die in gewöhnlicher Luft schwach anomal waren, in eine feuchte Kammer die Leitfähigkeitsabnahme in beliebiger Stärke zu erhalten. Wurde ein solches Präparat nach der Behandlung in der feuchten Kammer in den Stromkreis eingeschaltet und sofort belichtet, so konnte man meist nur eine Abnahme der Leitfähigkeit beobachten. Wurde das Präparat 24 Stunden im Freien aufbewahrt, so ging der Abnahme der Leitfähigkeit bei Bestrahlung bereits eine kurze Zunahme voraus. Am folgenden Tage konnte man meist nur mehr starke Ermüdung beobachten; das Präparat war also ungefähr in den früheren Zustand zurückgekehrt. Wurde nun das Präparat kurze Zeit auf einer Temperatur von 30—40° gehalten, so daß es austrocknen konnte, so fiel die Dunkelleitfähigkeit noch um 10—30 Prozent und nun zeigte das Präparat bei Belichtung nur mehr Leitfähigkeitszunahme, verhielt sich also normal, um später in der Luft wieder allmählich anomal zu werden. Normale Zellen zeigten bei gleicher Behandlung nur geringe Veränderungen.

Mehrere Präparate, die zugleich mit anomalen Zellen hergestellt worden waren, kamen sofort nach der Abkühlung in klares Öl. Sie verhielten sich stets normal und zwar nicht bloß im Ölbad selbst, sondern auch nach Herausnahme aus demselben. Die dem Präparat anhaftende Ölschicht verhinderte eben ein Eindringen von Feuchtigkeit.

Aus den Seite 151 angeführten Versuchen ergibt sich, daß sich in hygroskopischen Zellen der Abfall der Stromstärke im Dunkeln um so stärker äußert, je höher die Spannung ist, und daß sich die Zelle beim Übergang zu einer kleineren Spannung wieder erholt. Da also jede Änderung der Stromstärke von Einfluß auf den Dunkelwert ist, so müssen die bei Belichtung und Verdunkelung einer feuchten Selenzelle auftretenden Leitfähigkeitsänderungen die Stromstärke beein-

flussen und zwar in entgegengesetztem Sinne als die Belichtung und Verdunkelung auf eine normale Zelle wirkt. Die bei Belichtung des feuchten Selens auftretende Leitfähigkeits- und Stromzunahme drückt die eigene Stromstärke wieder herab; umgekehrt muß bei Verdunkelung infolge der Abnahme der Leitfähigkeit bezw. Stromstärke die Zelle sich wieder erholen, die Stromstärke also wieder langsam anwachsen, wie es verschiedentlich beobachtet wurde und in Fig. 126 bei Kurve IV gestrichelt angedeutet ist. So wird also die Dunkelleitfähigkeit einer feuchten Zelle indirekt durch die Belichtung und Abdunkelung beeinflußt und zwar in entgegengesetztem Sinne als bei einer normalen Zelle. Eine direkte Herabsetzung der Leitfähigkeit des feuchten Selens unter dem Einflusse des Lichtes existiert dagegen nicht. Die Stromänderung, die man gleich nach dem Einschalten des Stromes an einem belichteten feuchten Präparat beobachtet, setzt sich also mindestens aus folgenden Teilen zusammen: 1) aus der Abnahme infolge des Durchganges des Dunkelstromes, 2) aus der Zunahme infolge des lichtelektrischen Stromes, 3) aus der Abnahme infolge des Durchganges des lichtelektrischen Stromes. Die unter 1) und 3) angeführten Änderungen beruhen auf Polarisation und Verdampfung der Feuchtigkeit.

Zusammenfassend können wir feststellen:

Es gibt hygroskopisches und nicht hygroskopisches Selen. Erstere Selenart erhält man am besten durch Kristallisation aus dem Schmelzfluß und äußerst langsame Kühlung. Hygroskopische Präparate zeigen nur unter bestimmten Bedingungen ein anomales Verhalten. Sie erweisen sich ganz normal bei Belichtung ohne Stromdurchgang, nach langem Stromdurchgang, nach sorgfältigem Trocknen und nachfolgendem Einbringen in ein Vakuum oder Öl. Durch entsprechende Polarisation, Veränderung der Stromstärke, Variieren der Lichtintensitätt und Anwendung feuchter Luft läßt sich das anomale Verhalten im Lichte mehr oder weniger deutlich zum Ausdruck bringen. Alle Versuche, die Ursache des anomalen Lichteffektes aufzuklären, führten zu demselben Resultat; es handelt sich nicht um eine spezifische Eigenschaft des Selens oder um einen chemischen Vorgang, sondern lediglich um Einflüsse der Feuchtigkeit und insbesondere der Luftfeuchtigkeit. Alle an einzelnen Präparaten bis jetzt beobachteten anomalen Erscheinungen lassen sich an hygroskopischen Präparaten durch Behandlung mit feuchter Luft hervorrufen. Der Rückgang der Stromstärke bei Belichtung beruht zum größten Teil auf Polarisation, nur zum geringeren Teil auf einer Leitfähigkeitsverminderung infolge Verdampfung der Feuchtigkeit an Stellen größter Stromdichte. Der anomale Vorgang lagert sich bei Belichtung über die Leitfähigkeitsvergrößerung des Selens und verdeckt dieselbe ganz

oder teilweise. Im ersten Falle kommt die wahre Lichtempfindlichkeit erst bei der Abdunkelung durch die plötzliche Abnahme der Leitfähigkeit zur Geltung, im zweiten Falle erkennt man sie auch an der momentanen Leitfähigkeitserhöhung mit dem Auffallen der Lichtstrahlen.

Die Ergebnisse meiner Forschungen über den Einfluß der Feuchtigkeit auf die Lichtempfindlichkeit des Selens haben nicht bloß theoretischen Wert, sondern auch praktische Bedeutung für den Bau von Selenzellen; sie beweisen uns, wie dringend notwendig es ist, Selenzellen sofort nach der Herstellung (am besten schon am Schlusse der Kristallisation vor der Abkühlung auf Zimmertemperatur) mit einer durchsichtigen Firnisschicht zu überziehen oder in luftleeren Röhren einzuschließen, um sie vor den Einflüssen der atmosphärischen Luft zu schützen. Vereinzelt wurde dieses nun allgemein übliche Verfahren auch früher schon angewendet z. B. von Bronk (149) für seine zylindrischen Zellen.

XI. Negative Lichtempfindlickkeit.

An einem hygroskopischen Selenpräparat (S. 148) kann man bei Belichtung je nach dessen Feuchtigkeitsgehalt die verschiedenartigsten Änderungen der Stromstärke beobachten. Wird das Präparat getrocknet, so verhält es sich normal; die elektrische Leitfähigkeit steigt bei Belichtung momentan rasch an, um dann wieder langsam abzufallen (Kurve I in Fig. 131); bei Verdunkelung geht die Leitfähigkeit rasch gegen den Dunkelwert zurück, erreicht ihn aber erst nach längerer Zeit wieder. Das Präparat zeigt also die Ermüdungs- und Trägheitserscheinungen in bekannter Weise. Bringt man das Präparat kurze Zeit in freie Luft, so beobachtet man bei Belichtung die durch Kurve II veranschaulichten Stromänderungen; die Ermüdung hat zugenommen, die Stromstärke fällt nach der Abdunklung unter den ursprünglichen Dunkelwert herab. Hat das Präparat mehr Feuchtigkeit aufgenommen, so beobachtet man bei Belichtung momentan noch eine schwache Zunahme, dann ein rasches Abfallen der Stromstärke unter den Dunkelwert; bei Verdunkelung findet erst noch eine weitere Abnahme statt, ehe die Rückkehr erfolgt (Kurve III). Bei sehr feuchten Zellen kommt die momentane Zunahme zu Beginn der Belichtung auch noch in Wegfall, die Stromstärke fällt gleich ab und erleidet bei Verdunkelung noch einen weiteren Rückgang, um sich nachher wieder langsam zu erholen (Kurve IV). Wesentlich ist, daß bei diesen Versuchen der Strom nicht allzulange vor der Bestrahlung eingeschaltet wird.

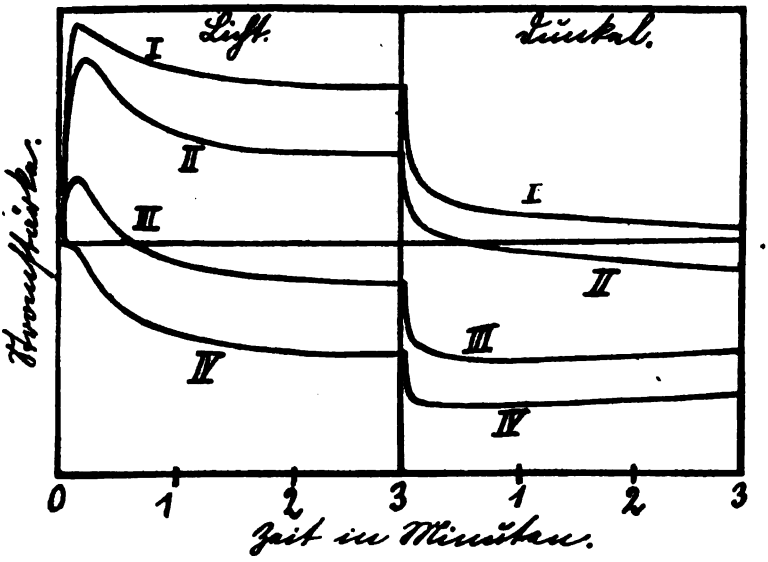


Fig. 131.

Die durch die Kurven II, III und IV dargestellten Änderungen der Stromstärke haben nur einige Forscher an einzelnen Zellen verschiedener Herstellung beobachtet. Merkwürdiger Weise hat man nicht versucht, die auffallenden Präparate unter verschiedenen Versuchbedingungen zu prüfen und ihr sonderbares Verhalten durch andere Einflüsse zu erklären, obwohl die Zellen starken zeitlichen Änderungen unterworfen waren; man war vielmehr geneigt, die Leitfähigkeitsabnahme bezw. Widerstandszunahme als eine spezifische Eigenschaft des Selens anzusehen, und bezeichnete die Widerstandsabnahme bei Belichtung als positive Lichtempfindlichkeit oder Lichtempfindlichkeit erster Art, die Widerstandszunahme dagegen als negative Lichtempfindlichkeit oder Lichtempfindlichkeit zweiter Art. Es läßt sich unschwer zeigen, daß die von den einzelnen Forschern beobachtete negative Empfindlichkeit nur eine scheinbare ist und durch Übereinanderlagerung mehrerer Vorgänge zustande kommt. Die Erscheinung erklärt sich in den meisten Fällen durch den Einfluß von Feuchtigkeit und Verunreinigungen, kann aber auch durch die Inkonstanz des Widerstandes und den Wechsel des Temperaturkoeffizienten hervorgerufen sein.

Kalischer (92) beobachtete an einigen Zellen bei schwacher Belichtung Zunahme des Widerstandes, bei großer Lichtintensität aber momentane Abnahme mit nachfolgender Zunahme. Bei Verdunkelung fand erst noch eine weitere Widerstandszunahme statt, ehe die Rückkehr erfolgte. Durch Vari-

ieren der Lichtstärke konnte bald Zunahme, bald Abnahme des Widerstandes erzielt werden. Der Widerstand war großen zeitlichen Schwankungen unterworfen; gewöhnlich nahm er im Laufe der Zeit ab und damit verschwand ihre positive Lichtempfindlichkeit ganz.

Auffallen muß sofort, daß bei Eintritt der Verdunkelung momentan eine weitere Widerstandszunahme erfolgt; man sieht, daß mit der Verdunkelung eine Energiequelle ausgeschaltet wird, unter deren Einfluß der Widerstand geringer ist, und das ist eben die Lichtstrahlung. Man kann die Wirkung des Lichtes auf eine solche Zelle sehr schön dadurch zeigen, daß man nach der Verdunkelung gleich wieder belichtet, was ein sofortiges Sinken des Widerstandes zur Folge hat. Daraus ersieht man, daß die positive Lichtwirkung anfänglich lediglich durch andere Vorgänge verdeckt ist und daß es sich bei der beobachteten Widerstandszunahme nicht um eine direkte Einwirkung des Lichtes auf das Selen handeln kann. Könnte das Licht durch direkte Einwirkung den Widerstand des Selens erhöhen, so müßte derselbe doch bei Verdunkelung wieder abnehmen. Die von Kalischer verwendeten Zellen waren offenbar feucht bezw. hygroskopisch; denn sie zeigten nicht bloß im Lichte das für feuchte Präparate charakteristische Verhalten, wie es durch Kurve III und IV in Fig. 131 dargestellt ist, sondern verhielten sich auch im Dunkeln wie jene, indem ihr Widerstand nach der Herstellung zugleich mit der Lichtempfindlichkeit von Tag zu Tag bis zu einem Minimum abnahm.

Nach Weigel (235) beruht die Lichtempfindlichkeit des Selens nicht auf einer Zunahme der Leitfähigkeit des Selens selbst, sondern auf einer Widerstandsverminderung des absorbierten Wassers unter dem Einflusse des Lichtes; die Selenzelle muß nach ihm unbedingt eine bestimmte Wassermenge enthalten, um überhaupt lichtelektrisch empfindlich zu sein. Um diese seine Anschauung zu stützen, sucht Weigel festzustellen, daß die Lichtempfindlichkeit verschwindet, wenn dem Selen das Wasser entzogen wird. Ein Präparat, das in ein Gefäß mit Phosphorpentoxyd gebracht wurde, besaß anfänglich gute Lichtempfindlichkeit, die allmählich abnahm; schließlich wurde das Präparat anomal, es trat bei Belichtung bisweilen Widerstandszunahme auf. Nun habe ich (315, 383) bei meinen zahlreichen Versuchen, bei denen ich ganz trockene Präparate der Feuchtigkeit bezw. dem Wasserdampf aussetzte, stets ohne Ausnahme eine allmähliche Abnahme der Lichtempfindlichkeit bis zu Null und negativen Werten konstatieren können. Es scheint mir daher bei dem Weigelschen Versuch irgend ein Mangel vorzuliegen; denn der Ausfall der Untersuchung deutet darauf hin, daß das Präparat eher Feuchtigkeit aufgenommen als abgegeben hat. Ich habe nun den

Versuch verschiedene Male wiederholt und bin in allen Fällen zu dem entgegengesetzten Resultat gelangt: Entzieht man dem Selen Wasser, so steigt die Lichtempfindlichkeit, ein Ergebnis, das vollständig im Einklang mit den Beobachtungen aller anderen Forscher steht.

Eine Selenzelle wurde in ein Glasgefäß, das Phosphorpentoxyd enthielt, luftdicht eingeschlossen und mehrere Tage hintereinander geprüft. Besondere Sorgfalt mußte darauf verwendet werden, daß die Temperatur konstant blieb. Sofort nach dem Einbringen betrug die Dunkelleitfähigkeit des Präparates 158, nach 60 Sekunden langer Bestrahlung 204; bei Wiederholung des Versuches nach 1 Stunde erhielt ich die Werte 123 bezw. 173, am folgenden Tage 122 bezw. 172, nach 7 Tagen 118 bezw. 168. Ein anderes Präparat brachte ich in ein Gefäß, das Chlorcalcium enthielt. Die entsprechenden Werte waren gleich nach dem Einbringen 180 bezw. 430, nach 1 Stunde 160 bezw. 411, am folgenden Tage 150 bezw. 395, am nächsten Tag 141 bezw. 370, nach 7 Tagen 142 bezw. 372. Ähnliche Resultate lieferten andere Versuche. Man sieht, die Dunkelleitfähigkeit nimmt allmählich zugleich mit dem Wassergehalt des Präparates ab, während die Lichtempfindlichkeit etwas steigt.

Übrigens gibt Weigel selbst Beobachtungen an, die direkt das Gegenteil von dem beweisen, was er behauptet. Er brachte eine Zelle in destilliertes Wasser und belichtete sie wiederholt. Bei jeder folgenden Belichtung sank die Lichtempfindlichkeit immer mehr. Als die Zelle aus dem Wasser gebracht und getrocknet wurde, hatte sie wieder höhere Lichtempfindlichkeit, die aber beim Eintauchen der Zelle ins Wasser rasch sank, besonders beim Schütteln. Andere Reagenzien hatten noch einen größeren Einfluß und bewirkten Widerstandsvermehrung bei Belichtung. Dieser Versuch ist doch ein deutlicher Beweis für den schädlichen Einfluß des Wassers. Auch die Beobachtung Weigels, daß die Lichtempfindlichkeit im Vakuum größer ist als in freier Luft, spricht gegen seine eigene Auffassung und bestätigt meine Ergebnisse.

Sehr interessante Beobachtungen hat Schrott (258) bei der Abkühlung seiner Präparate von 210° auf Zimmertemperatur gemacht.

Chemisch reines Selen wurde geschmolzen, auf 195° C abgekühlt, 5 Stunden bei dieser Temperatur im Luftbad gehalten und sehr langsam gekühlt. Das so entstandene kristallinische Selen wurde gepulvert und 6 Stunden auf 210° erhitzt. Das Pulver zeigte sich nach diesem Prozesse zu einer festen Masse zusammengesintert, so daß es neuerlich zerrieben werden mußte. Ein aus diesem Material gepreßter Zylinder zeigte bei Zimmertemperatur im Lichte Widerstandsverrin-

gerung (positive Lichtempfindlichkeit). Bei Erwärmung nahm die Lichtempfindlichkeit unter kleinen Schwankungen immer mehr ab und verschwand bei 200° C vollständig. Die vollständig ausgezogene Kurve in Fig. 132 veranschaulicht die beobachteten Empfindlichkeitsänderungen, ausgedrückt in Prozenten nach folgender Formel:

$$\frac{W_d - W_b}{W_d} \cdot 100.$$

Das Präparat zeigte also bei der Erwärmung nur positive Lichtempfindlichkeit. Ganz anders verhielt es sich nun bei der Abkühlung. Die Lichtempfindlichkeit begann sofort wieder zu steigen, erreichte bei ca. 185° ein Maximum und fiel dann langsam ab. Bei 150° erwies sich das Präparat vollständig unempfindlich gegen das Licht. Als jetzt weiter abgekühlt wurde, zeigte sich bei Belichtung eine Widerstandsvergrößerung, also negative Lichtempfindlichkeit. In der Gegend von 100° änderte sich die Erscheinung dahin, daß bei den Messungen zunächst ein schwacher, eine Widerstandsabnahme anzeigender Ausschlag eintrat, unmittelbar darauf aber der Widerstand zunahm und über den Dunkelwiderstand bei weiterer Dauer der Belichtung anstieg. Es wurde darum der erste Ausschlag und der Ausschlag nach einer Minute bestimmt. In Fig. 132 veranschaulicht die gestrichelte Kurve die Empfindlichkeitsänderungen während der Abkühlung.

Fig. 132.

Unterhalb 110° teilt sich die Kurve in 2 Äste, von denen der obere die Empfindlichkeit zu Beginn der Bestrahlung, der untere die Empfindlichkeit nach einer Bestrahlung von 1 Minute angibt. Bei weiterer Abkühlung gegen Zimmertemperatur zeigt das Präparat im Lichte nur mehr eine Leitfähigkeitszunahme; die Leitfähigkeit ging zwar während der Bestrahlung zurück, fiel aber niemals mehr unter den Dunkelwert herab. Das Präparat war also normal geworden, besaß gute positive Lichtempfindlichkeit und die bekannte Ermüdungserscheinung.

Die von Schrott innerhalb gewisser Temperaturgrenzen beobachtete Widerstandszunahme, die er Lichtempfindlichkeit zweiter Art nennt, stellt sich bei genauerer Betrachtung nicht als eine spezifische Eigenschaft des Selens heraus, sondern als eine Übereinanderlagerung von 2 Vorgängen, von denen der eine den andern ganz oder teilweise verdeckt. Um die Erscheinung genau erklären zu können, muß man vor allem die Leitfähigkeitskurve des verwendeten Präparates kennen. In Fig. 133 stellt Kurve I die Widerstandsänderungen des Präparates bei Erwärmung von Zimmertemperatur bis 200° dar, Kurve II die Veränderungen bei der anschließenden Abkühlung. Bei der Erwärmung besaß das Präparat nur einen negativen Temperaturkoeffizienten des Widerstandes, bei der Abkühlung überwog bis gegen 180° der metallische Charakter, dann war der Temperaturkoeffizient fast bis Zimmertemperatur negativ. Ferner muß ich daran erinnern, daß man bei einem derartigen Erhitzungsprozeß je nach der Geschwindigkeit der Erhitzung sehr verschiedenartige Leitfähigkeiten beobachtet. Hält man während der Erwärmung nichtmetallischen Selens die Temperatur plötzlich konstant, so sinkt der Widerstand trotzdem immer noch weiter und zwar zuerst rasch, dann immer langsamer bis zu einem Minimum; ebenso wächst der Widerstand immer noch weiter, wenn man während der Abkühlung die gleiche Temperatur längere Zeit beibehält. Bei dem auf Seite 36 angeführten Erhitzungsprozeß mußte Marc die Temperatur meist 1 bis 3 Tage konstant halten, bis der Widerstand annähernd stabil geworden war, und der ganze Versuch nahm mehrere Wochen in Anspruch. Bei dem Schrottschen Verfahren spielen diese Verschiebungen des Dunkelwiderstandes während jeder Beobachtung, die Inkonstanz des Widerstandes, eine große Rolle; der Einfluß muß um so größer sein, je rascher der ganze Erhitzungsprozeß ausgeführt wurde.

Wir wollen nun die Widerstandsänderungen während der Abkühlung betrachten. Es lagern sich immer zwei Vorgänge über einander und zwar: a) die Widerstandsabnahme infolge der Bestrahlung, b) die Änderung des Dunkelwiderstandes während der Versuchsdauer. Letztere hat je nach dem Tempera-

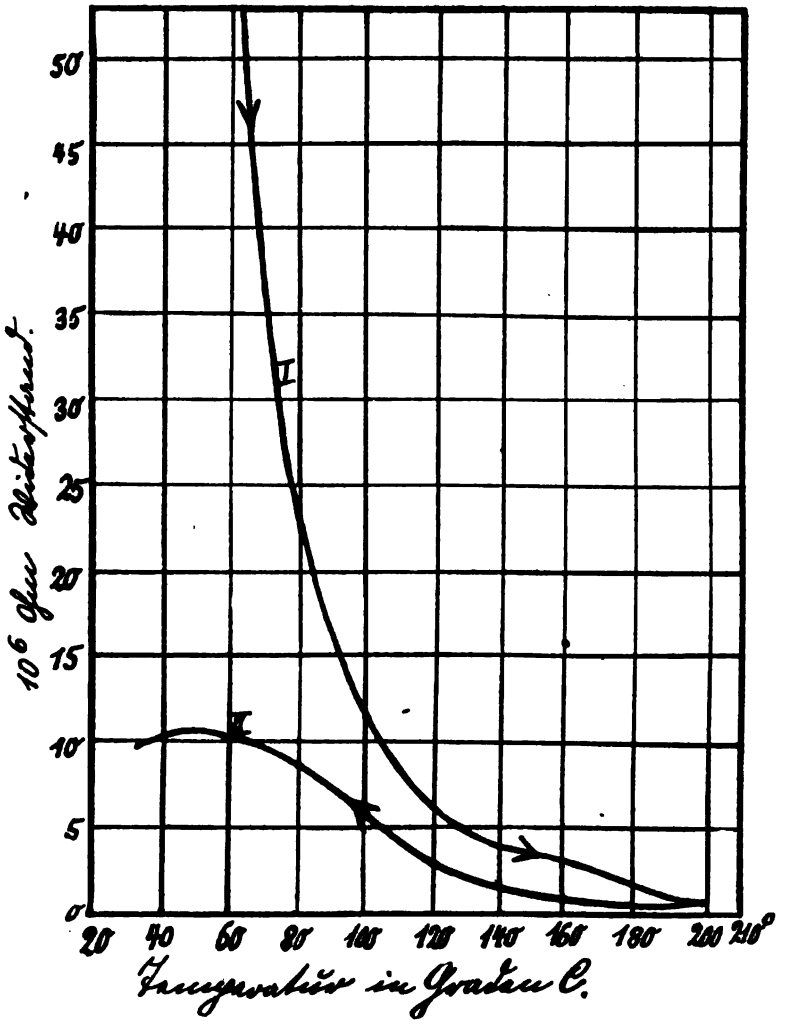


Fig. 133.

turkoeffizienten des Widerstandes verschiedene Richtung. Von 200 bis 180° besaß das Präparat metallischen Charakter, es trat also bei Abkühlung eine Abnahme des Widerstandes ein. Bei jeder Beobachtung innerhalb dieses Bereiches setzt sich also der Effekt a) aus einer Widerstandsabnahme infolge der Belichtung, b) aus einer unbedeutenden Abnahme des Widerstandes während der Versuchsdauer zusammen. Anders liegen die Verhältnisse bei Abkühlung von 180° bis gegen Zimmertemperatur; hier nimmt mit Temperaturerniedrigung und auch bei Konstanthalten der Temperatur der Widerstand zu und

zwar besonders in der Gegend von 140—90°. Hier lagern sich bei jeder Beobachtung folgende Vorgänge über einander: a) Widerstandsabnahme bei Belichtung, b) Widerstandszunahme während des Versuches. Da letztere in der Gegend von 120° bedeutend, erstere aber, wie die Erwärmungskurve (obere Kurve in Fig. 132) zeigt, nur gering war, so mußte die Widerstandszunahme überwiegen. Bei weiterer Abkühlung wächst die Lichtempfindlichkeit immer mehr, die Widerstandszunahme während des Versuches aber nimmt ab. Daher muß der Vorgang a mit Temperaturerniedrigung mehr und mehr überwiegen, besonders am Anfang der Belichtung, da der Vorgang a momentan, der Vorgang b langsamer sich vollzieht. Mit Annäherung an die Zimmertemperatur beobachtet man somit bei Belichtung nur mehr eine Widerstandsabnahme mit nachfolgender kleiner Zunahme.

Die Änderungen der Lichtempfindlichkeit an einem anderen Präparat ersieht man aus den Kurven in Fig. 134. Das

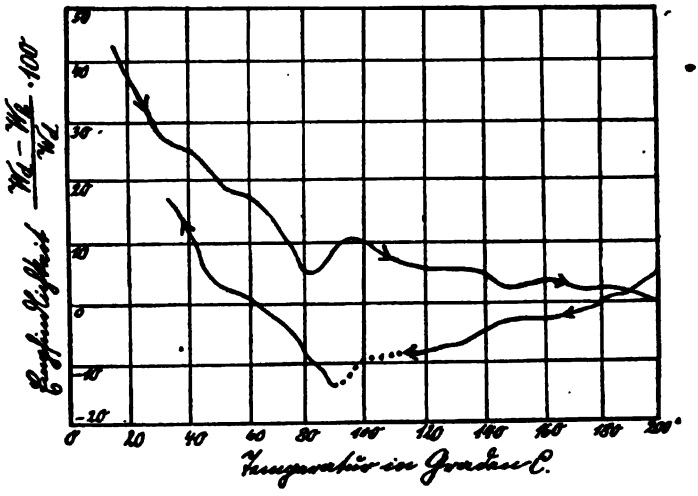


Fig. 134.

verwendete Selen gehörte der harten Modifikation an, es war durch einen Erhitzungsprozeß unter 200° gewonnen worden. Der Temperaturkoeffizient des Widerstandes war während der Erwärmung und Abkühlung negativ; die Lichtempfindlichkeit wurde nach einer Beleuchtungsdauer von 20 Sekunden festgestellt. Bei Erwärmung nahm die Lichtempfindlichkeit gegen 200° C ab, um dort ganz zu verschwinden; oberhalb 80° C zeigt die Kurve eine Unregelmäßigkeit, die auf stattgefundene molekulare Umlagerungen schließen läßt. Bei der

Abkühlung erhielt Schrott zwischen 185° und 65° eine Widerstandsabnahme bei Belichtung; innerhalb dieses Temperaturbereiches war also die Widerstandsabnahme infolge der Bestrahlung offenbar geringer als die Zunahme des Widerstandes während des Versuches. Erst innerhalb des Temperaturbereiches, in dem die wahre Lichtempfindlichkeit größere Werte annimmt und zwar unter 60° steigt die Widerstandsabnahme bei Belichtung ganz beträchtlich an.

Man darf wohl annehmen, daß Schrott bei seinen Versuchen keine Widerstandszunahme bei Belichtung beobachtet hätte, wenn mit der Belichtung stets bis zur Erreichung eines annähernd konstanten Widerstandes gewartet worden wäre. Bei Zimmertemperatur konnte Schrott in keinem Falle eine Abnahme des Widerstandes an belichtetem Selen feststellen.

Pochettino und Trabacchi (253, 287) beobachteten an Zellen, die durch Kristallisation des Selens aus dem Schmelzfluß und recht langsame Abkühlung gewonnen worden waren, nach der Herstellung sehr hohen Widerstand und gute Lichtempfindlichkeit. Mit der Zeit nahm der Widerstand immer mehr ab und erreichte schließlich nach ca. einem Monat einen auffallend niedrigen Wert. Zugleich mit dem Widerstand fiel die Lichtempfindlichkeit beständig ab bis zu Null und negativen Werten, so daß dann bei Belichtung eine Widerstandszunahme zu beobachten war.

Es genügt wohl darauf hinzuweisen, daß diese Zellen sowohl in der Herstellung als auch in ihrem ganzen Verhalten vollständig meinen hygroskopischen Präparaten gleichen, so daß die daran beobachtete negative Empfindlichkeit auf den Einfluß der Feuchtigkeit zurückzuführen ist.

Interessant sind die Beobachtungen, die Pochettino und Trabacchi an den beschriebenen Zellen bei Behandlung mit Wechselströmen gemacht haben. Unter der Einwirkung von Wechselströmen fand eine bedeutende Widerstandszunahme statt, die auch nach Aufhören des Wechselstromes noch 4—5 Minuten anhält. Gleichzeitig nahm die negative Lichtempfindlichkeit immer mehr ab und schließlich wurden die Zellen normal, sie zeigten Widerstandsabnahme bei Belichtung; der Effekt wechselte also sein Zeichen. Unter dem Einflusse des Wechselstromes wuchsen demnach Widerstand und positive Lichtempfindlichkeit zugleich, wie es nach den früheren Ausführungen (S. 64) nicht anders zu erwarten ist. Die Wirkung des Wechselstromes war aber keine bleibende, indem schon nach einigen Tagen die Zelle in den früheren Zustand zurückkehrte. Da die Behandlung mit Wechselströmen den gleichen Erfolg hat wie eine Trocknung der Zellen, muß man annehmen, daß die Wechselströme eine Verdrängung und Verdampfung der Feuchtigkeit bewirken.

Brown (348, 391, 414, 415) hat sich wiederholt mit der Herstellung negativ lichtempfindlichen Selens beschäftigt. Seine Zellen besaßen außerordentlich hohe Leitfähigkeit und negativen Temperaturkoeffizienten des Widerstandes. Bei längerem Stromdurchgang nahm die Dunkelleitfähigkeit ab, ebenso bei mehreren hinter einander folgenden Messungen. Im Lichte trat eine unbedeutende Widerstandszunahme ein, die bei einer Zelle mit einem Dunkelwiderstand von 117 Ohm ca. 1,5 Ohm, bei 191 Ohm etwa 2 Ohm, bei 262,5 Ohm nur 1,1 Ohm betrug und in den meisten Fällen sogar noch geringer war. Wenn der Widerstand der Zellen während des Experimentes zugenommen hatte, war nachher bei Bestrahlung der negative Wert viel geringer. Im Laufe der Zeit verloren die Zellen manchmal ihre Empfindlichkeit ganz.

Das Verhalten dieser Zellen, die auf chemischem Wege hergestellt worden waren, erinnert in allen Punkten an meine feuchten Präparate; die Vorgänge in den Brownschen Zellen sind indes wesentlich andere. Während bei den oben beschriebenen hygroskopischen Präparaten die positive Lichtempfindlichkeit d. h. die Widerstandsabnahme bei Belichtung auf den Verlauf der Erscheinung von Einfluß ist, bleibt hier eine Einwirkung des Lichtes auf das Selen selbst ausgeschlossen. Denn die Brownschen Zellen haben durchschnittlich einen Widerstand von 100 Ohm, während ein in gleicher Weise aus reinem trockenem Selen hergestelltes Präparat einen mindestens tausendmal größeren Widerstand aufweisen würde, so daß das Selen selbst an der Leitfähigkeit in den Brownschen Zellen kaum einen Anteil hat; unter diesen Umständen kann auch eine Lichtwirkung auf das Selen niemals zur Geltung kommen. Es kann sich demnach nur um einen photochemischen Vorgang handeln, um einen Einfluß des Lichtes auf die Verunreinigungen des Selens, also um einen Effekt, an dem das Selen selbst nicht beteiligt ist. Die Richtigkeit dieser Anschauung wird durch folgende von Brown (414, 415) später angegebene Methode zur Herstellung negativ lichtempfindlichen Selens bestätigt.

Um Selenzellen zu erhalten, deren Leitfähigkeit bei Belichtung eine Leitfähigkeitsabnahme zeigt, behandelt man positiv lichtempfindliches kristallinisches Selen oder auch die nichtleitende amorphe Modifikation mit Quecksilberdämpfen. Brown brachte positiv lichtempfindliche Zellen, deren Widerstand ca. 20 Millionen Ohm hatte, in das Vakuum einer Quecksilberluftpumpe. Im Vakuum von 0,01 mm trat innerhalb 20 Minuten keine merkliche Änderung des Widerstandes ein, dagegen war nach 12 Stunden der Widerstand auf 40 Ohm gesunken. Es zeigten sich nun im Dunkeln und Lichte Unregelmäßigkeiten, wie sie sonst bei negativ lichtempfindlichen Präparaten zu beobachten sind. Es unterliegt meines Er-

achtens keinem Zweifel, daß die Ursache des geringen Widerstandes und der anomalen Erscheinungen in der Absorption des Quecksilberdampfes durch das Selen zu suchen ist. Als weiteres Verfahren empfiehlt Brown, amorphes Selen in das Vakuum einer Quecksilberluftpumpe zu bringen oder bei atmosphärischem Druck über erhitztes Quecksilber zu halten, bis es schwarz geworden ist. In diesem Falle erhält also das amorphe Selen, ein Isolator, verhältnismäßig hohe elektrische Leitfähigkeit durch Aufnahme von Quecksilberteilchen. Die Quecksilberdämpfe setzen also die positive Lichtempfindlichkeit auf Null herab, verleihen den Präparaten die hohe Leitfähigkeit und bewirken jene anomalen Erscheinungen, die als negative Lichtempfindlichkeit bezeichnet werden. Es handelt sich also hier nicht um eine spezifische Eigenschaft des Selens selbst, sondern um die Wirkung von Verunreinigungen. Bei dieser Gelegenheit sei noch darauf hingewiesen, daß manche Gase keinen wesentlichen Einfluß auf die Lichtempfindlichkeit auszuüben scheinen; so fand Marc (282) für seine Zellen in trockener Luft, in Kohlensäure und im Vakuum die gleiche Lichtempfindlichkeit.

Zellen derselben Art erhielt Crum (373); ihr Dunkelwiderstand war sehr veränderlich, im Lichte trat eine Zunahme von weniger als 1 % ein.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die sogenannte negative Lichtempfindlichkeit keine spezifische Eigenschaft des Selens ist; die von einzelnen Forschern bei Zimmertemperatur beobachtete Widerstandszunahme des belichteten Selens beruht auf dem Einflusse von Feuchtigkeit und Verunreinigungen, dagegen erklären sich die während eines Erhitzungsprozesses auftretenden ähnlichen Erscheinungen durch die Inkonstanz des Widerstandes und den Wechsel des Temperaturkoeffizienten.

XII. Sekundärströme, Gleichrichterwirkung, Wechselstromeffekt.

Es ist erwiesen (S. 149), daß bestimmte Selenpräparate stark hygroskopisch sind und beim Durchgang eines Gleichstromes einen kräftigen Polarisationsstrom zeigen. Durch sorgfältiges Trocknen kann man die Feuchtigkeit aus dem Präparat austreiben, worauf es kaum mehr eine Spur von Polarisation besitzt. Im Laufe der Zeit wird das Präparat in der Atmosphäre wieder polarisierbar. Durch entsprechende Kristallisation und Abkühlung lassen sich Selenpräparate herstellen, die im allgemeinen keine Polarisationserscheinungen aufweisen; solche Zellen besitzen einen höheren spez. Widerstand als feuchtes Selen. Polarisiert man eine hygroskopische Selenzelle, so verhält sie sich bei Beleuchtung ähnlich wie ein galvanisches Selenelement (S. 188). Bei geringer Polarisation tritt im Lichte gewöhnlich eine kleine Zunahme des Stromes ein, während bei stärkerer Polarisation stets eine Abnahme des Polarisationsstromes zu beobachten ist; bisweilen läßt sich bei Einwirkung des Lichtes eine momentane Zunahme, dann Abnahme des Polarisationsstromes feststellen (Uljanin 98, Ries 315).

Nun haben einige Forscher an Selenzellen nach dem Durchgang eines Stromes einen entgegengesetzt gerichteten Strom beobachtet, der einem Polarisationsstrom ähnlich ist, aber nach seinen Eigenschaften nicht von Feuchtigkeit herrühren kann. Die Erscheinung wurde zuerst von Adams und Day (23) an einem Selenpräparat mit 2 Platinelektroden beobachtet, aber erst 32 Jahre später von Pochettino (311) eingehender studiert. Pochettino nennt den Strom, dessen Ursache heute noch unbekannt ist, Sekundärstrom.

Nach Pochettino ist der Sekundärstrom um so kräftiger, je größer der Widerstand der Zelle. (Bei dem Polarisationsstrom ist dies bekanntlich umgekehrt.) Steigert man den Widerstand eines Selenpräparates durch die bekannten Hilfsmittel, so wächst gleichzeitig der Sekundärstrom. Läßt man den primären Strom nicht länger als eine Sekunde wirken, so wächst die Anfangsstärke des sekundären Stromes proportional der elektromotorischen Kraft des primären Stromes und der Quadratwurzel aus seiner Dauer. Der Sekundärstrom tritt am deutlichsten an den Zellen auf, die eine ausgesprochen positive Lichtempfindlichkeit zeigen. (Die Polarisationsströme treten dagegen in besonderer Stärke an anomalen Zellen auf.) Belichtung setzt den sekundären Strom herab. Die Natur des Elektrodenmaterials scheint von Einfluß auf die Erscheinung zu sein; besonders wirksam zeigten sich Elektroden aus

Eisen und Zink. Das Auftreten des Sekundärstromes läßt sich nicht durch einen thermoelektrischen Effekt erklären.

An manchen Selenpräparaten kann man je nach der Dauer und Richtung des Stromes verschiedene Widerstände, also unipolare Leitung, finden. Die durch die Stromrichtung bedingte Widerstandsdifferenz wächst mit der Zeit des Stromdurchganges und wird schließlich konstant; sie geht nach Ausschalten des Stromes zurück und scheint im Augenblick des Einschaltens gleich Null zu sein. Die Erscheinung ist gewöhnlich an anomalen Präparaten zu beobachten; an vollkommen trockenen normalen Zellen haben Pfund (336), Ries (383), Fürstenau (480) keine Spur eines Polarisations- bezw. Sekundärstromes oder einer unipolaren Leitung finden können. Nach Weigel (235) ist die unipolare Leitung keine spezifische Eigenschaft des Selens; sie ist durch die Anwesenheit von Feuchtigkeit im porösen Selen verursacht und verschwindet beim Austrocknen eines Präparates. Nach Greinacher (481) ist die Erscheinung durch Polarisation allein nicht zu erklären.

Da unipolare Körper als Gleichrichter dienen können, muß sich eine Selenzelle, deren Widerstand in den beiden Stromrichtungen verschieden ist, zur Gleichrichtung von Wechselströmen verwenden lassen (Weigel 235). Schaltet man z. B. eine solche Zelle in einen Zweig der Wheatstoneschen Brücke und reguliert die Widerstände der drei anderen Zweige derartig, daß bei Verwendung eines Gleichstromes durch das in der Brücke liegende Galvanometer kein Strom mehr fließt, so muß bei Benützung eines Wechselstromes das Galvanometer einen Gleichstrom anzeigen, da die Selenzelle dem Wechselstrom in der einen Richtung einen kleineren Widerstand entgegensetzt als in der anderen.

Nach Pochettino (337) ist die Fähigkeit einer Selenzelle einen Wechselstrom gleichzurichten um so größer, je höher ihr Widerstand ist; im übrigen findet er, daß sich die Selenzellen analog den elektrolytischen Gleichrichtern verhalten. Daß sich durch Behandlung mit Wechselströmen sowohl Widerstand als auch Empfindlichkeit einer normalen und anomalen Selenzelle steigern lassen, wurde schon früher erwähnt. Der durch Wechselströme erzielte Effekt ist aber nicht von Dauer, die normalen Zellen kehren in ca. 8 Tagen, die anomalen bereits in 1—2 Tagen in den ursprünglichen Zustand zurück.

Greinacher und Miller (482) beobachteten an Selenzellen eine starke Gleichrichterwirkung; sie unterscheiden 2 verschiedene Gleichrichtereffekte, einen normalen, der von der Wechselstromrichtung unabhängig ist, und einen anomalen, der von der Wechselstromkurve abhängt und seine Richtung beim Kommutieren des Wechselstromes ändert.

Bei meinen (512) Selenzellen änderte sich die Richtung des durch Gleichrichterwirkung erzeugten Gleichstromes nicht, wenn die Zelle bald in der einen, bald in der anderen Richtung eingeschaltet wurde. Die Ursache der Gleichrichterwirkung an Seleenzellen scheint also nicht bloß auf der Verschiedenheit des Widerstandes in beiden Richtungen zu beruhen. Die Höhe des Widerstandes hat aber einen wesentlichen Einfluß auf die Höhe der Gleichrichterwirkung. Setzt man den Widerstand herab z. B. durch Temperaturveränderung, so nimmt auch der Gleichrichtereffekt ab. Verwendet man Selenzellen von besonders hohem Widerstand, so springt der elektrische Funke zwischen den Elektroden über und zerstört die Zellen ganz oder teilweise.

Bei seinen Versuchen über die Gleichrichterwirkung fand Greinacher (481) die auffallende Erscheinung, daß außer dem Gleichrichtereffekt noch eine Widerstandsverringerung des Selens auftritt, sobald man zum Wechselstrom noch einen Gleichstrom hinzuschaltet. Die Versuchsanordnung war im allgemeinen die in Fig. 135 angegebene Brückenschaltung. Zu-

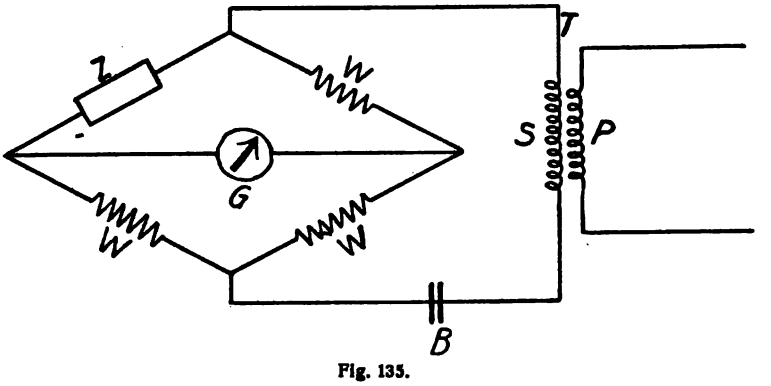


Fig. 135.

erst wurden unter Verwendung von Gleichstrom die Widerstände W gegen den Widerstand der Selenzelle Z so abgeglichen, daß das Galvanometer G in der Brücke stromlos war. Da die zur Verwendung kommenden Zellen die Eigenschaft besaßen, daß ihr Widerstand bei Hindurchgang von Gleichstrom wuchs, mußte solange abgeglichen werden, bis das Galvanometer keine merkliche Veränderung im Selenwiderstand mehr anzeigte. Dann wurde der Gleichstrom der Batterie B abgeschaltet und der Wechselstrom, den die Sekundärspule S des Transformators T lieferte, angeschlossen. Das Galvanometer zeigte nun einen Ausschlag und zwar war der angezeigte Gleichstrom dem vorangegangenen Strome entgegengerichtet. Wurde aber der Gleichstrom der Batterie B

nicht ausgeschaltet und der Wechselstrom darüber gelagert, so zeigte sich die merkwürdige Erscheinung, daß nun der Effekt in entgegengesetzter Richtung wie ohne gleichzeitigen Gleichstrom auftrat.

Greinacher verweist auf die auffallende Ähnlichkeit dieses Wechselstromeffektes mit dem Lichteffekt; sowohl bei Bestrahlung mit Licht als bei Durchgang eines Wechselstromes erhält man eine Vergrößerung des durch die Selenzelle hindurchgehenden Batteriestromes. Da nun die Wechselströme den Selenwiderstand ebenso zu beeinflussen scheinen wie Licht, so untersuchte Greinacher den Zusammenhang zwischen Licht- und Wechselstromeffekt und zwar die Abhängigkeit der beiden Effekte von der Intensität, der Stromstärke, der Temperatur und der Trägheit.

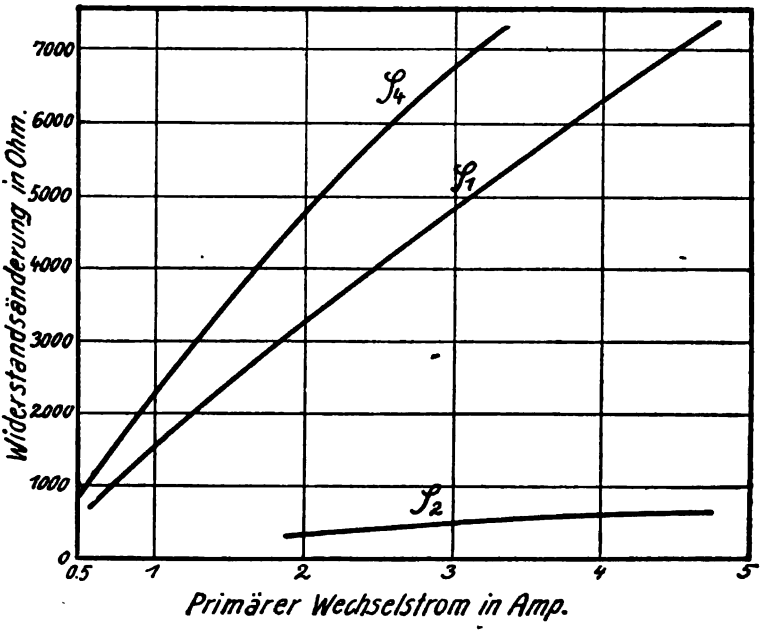


Fig. 136.

Figur 136 veranschaulicht die Widerstandsänderungen von 3 Selenzellen S_1, S_2, S_4 bei Änderung der Wechselstromintensität, während wir aus Fig. 137 die analogen Versuche an denselben Zellen mit Licht ersehen. Die Reihenfolge der Zellen für Licht- und Wechselstromempfindlichkeit ist genau die gleiche, auch haben die Lichtkurven ungefähr den gleichen Verlauf, so daß Licht- und Wechselstromeffekt dieselbe Ab-

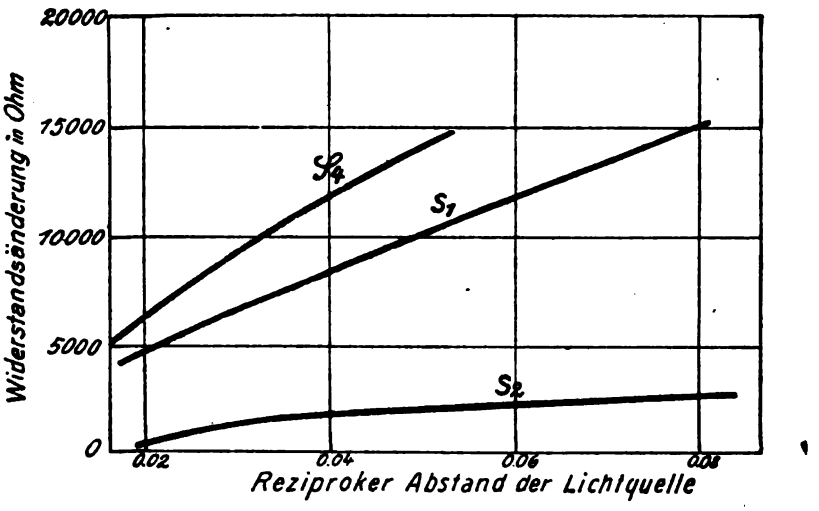


Fig. 137.

hängigkeit von der Energie aufweisen. Auch bei Temperaturerhöhung zeigen beide Effekte einen ähnlichen Verlauf, dagegen ist der Spannungs- und Trägheitseffekt in beiden Fällen sehr verschieden. Der Wechselstromeffekt nimmt mit der Spannung ganz bedeutend stärker ab als der Lichteffekt und die Trägheitskurven haben sogar für beide Effekte ein ganz verschiedenes Aussehen. Kurve 1 in Fig. 138 veranschaulicht die Leitfähigkeitsänderungen der Selenzelle S_3 bei 15 Minuten langer Belichtung und nachfolgender Verdunkelung, während Kurve 2 die entsprechenden Änderungen bei 15 Minuten dauernder Wechselstrombelastung angibt. Die bei Bestrahlung erhaltene Trägheitskurve zeigt nichts Auffallendes; dagegen trägt die Kurve 2 ganz den Charakter der Lichtträgheitskurven für anomale Zellen, wie ich sie gefunden habe (S. 154); wir sehen ein rasches Anwachsen zu einem Maximum, dann ein allmähliches Abfallen und beim Ausschalten des Wechselstromes ein rapides Sinken unter den anfänglichen Wert mit nachfolgendem langsamen Ansteigen. Charakterisch für alle Zellen ist die bedeutend geringere Trägheit für Wechselstrom als für Licht.

Greinacher erklärt die Unterschiede auf elektronentheoretischem Wege. Bei Bestrahlung können nur diejenigen Elektronen, die in der Strombahn liegen, sofort an der Stromführung teilnehmen, während die übrigen erst allmählich durch Diffussion in die Strombahn gelangen. Die Stromvergrößerung im Licht erreicht wegen der Tiefenwirkung erst nach einiger Zeit ihr Maximum. Ganz anders ist es beim Wechselstromeffekt, da der Wechselstrom genau den Weg

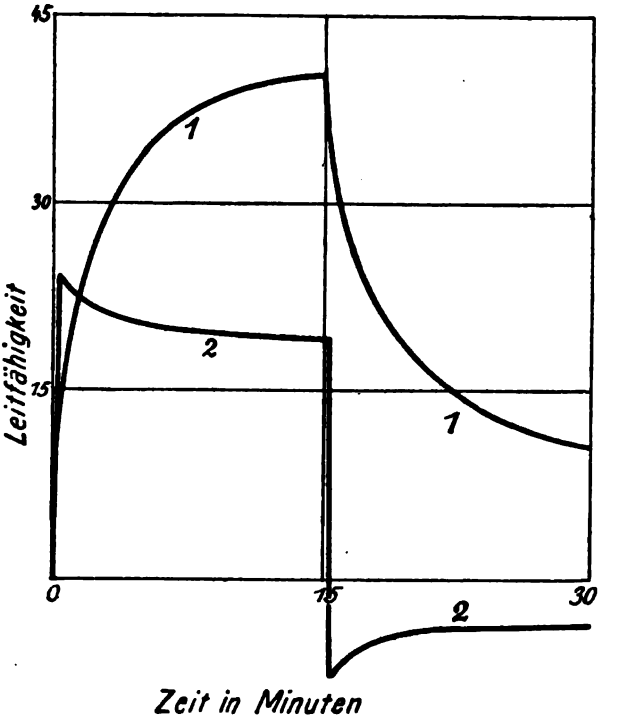


Fig. 138.

des Gleichstromes nimmt, so daß die durch den Wechselstrom abgetrennten Elektronen sofort durch den Gleichstrom transportiert werden.

Schließlich untersuchten Greinacher und Miller (482) die Abhängigkeit des Wechselstromeffektes von der Frequenz

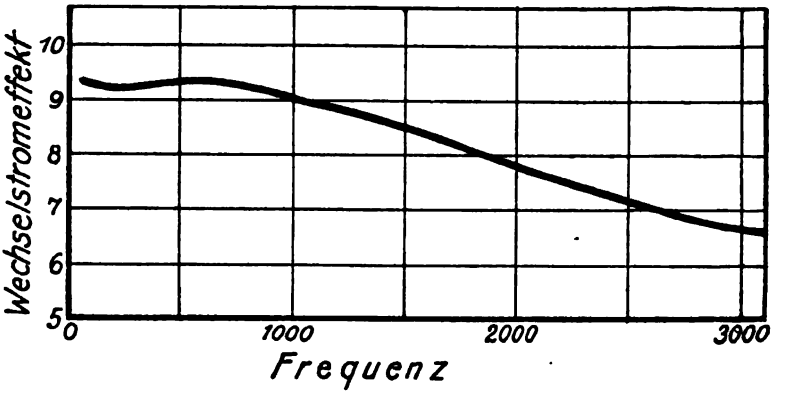


Fig. 139.

des Wechselstromes. Fig. 139 zeigt den Wechselstromeffekt als Funktion der Frequenz. Bis 1000 Perioden zeigt sich keine merkliche Änderung, von da ab fällt der Effekt allmählich ab.

Fürstenau (480) verweist nun darauf, daß die von Greinacher benützten Selenzellen offenbar anomale Zellen waren, denn sie wiesen alle Eigenschaften der anomalen Zellen auf. Da er selbst an seinen eigenen Zellen den Wechselstromeffekt nicht beobachten konnte, ist er der Anschauung, daß es sich hier nicht um eine neue spezifische Eigenschaft des Selens handelt, sondern daß der Wechselstromeffekt nur in anomalen Zellen auftritt und zwar als Folge der Widerstandsdifferenzen, die durch den Gleichstrom hervorgerufen werden. Greinacher (501) gelang es indes auch an Fürstenauschen Zellen den Wechselstromeffekt nachzuweisen.

Mir (513) ist es gelungen, durch eine einfache Versuchsanordnung die Existenz des Wechselstromeffektes an normalen Zellen zweifellos festzustellen und einen neuen Lichteffekt am Selen zu entdecken. Gleichzeitig fand ich auch, daß der von Greinacher vermutete Zusammenhang zwischen Licht- und Wechselstromeffekt nicht besteht. Während bei der von Greinacher angewendeten Versuchsanordnung nur ein ganz geringer Teil des Wechselstromes über die Selenzelle ging, sandte ich den Wechselstrom vollständig durch die Zelle. Ich bildete einen Stromkreis aus der Sekundärspule eines Induktoriums mit Summerunterbrecher, aus der Selenzelle, dem Galvanometer und einer Batterie, die beliebig ein- und ausgeschaltet werden konnte. Bei dieser Versuchsanordnung konnte auch der Einfluß des Lichtes auf den Wechselstromeffekt festgestellt werden, während bei der Greinacherschen Schaltung die Wirkung des Lichtes auf den nur geringen Wechselstromeffekt überdeckt wird durch die bedeutende Leitfähigkeitsänderung des Selens. Meine Beobachtungen will ich in 3 Punkte zusammenfassen:

1. Sendet man durch eine Selenzelle einen Gleich- und einen Wechselstrom, so entsteht ein Gleichstrom, der nicht gleich ist der algebraischen Summe aus dem eingeschalteten Gleichstrom und dem durch Gleichrichtung des Wechselstromes entstandenen Gleichstrom, sondern es tritt im allgemeinen eine Erhöhung des eingeschalteten Gleichstromes ein. Läßt man den Wechselstrom längere Zeit einwirken, so geht der Effekt etwas zurück. Die Ursache dieser Ermüdung beruht wohl auf der Tatsache, daß der Wechselstrom den Widerstand des Selens allmählich erhöht (S. 64). Der Wechselstromeffekt wächst im allgemeinen mit Zunahme des Gleichstromes und Wechselstromes. Setzt man den Widerstand und somit die Gleichrichterwirkung herab z. B. durch entsprechende Temperaturänderung, so nimmt zugleich damit der Wechselstromeffekt ab.

2. Sendet man einen Wechselstrom durch eine Selenzelle, so entsteht ein Gleichstrom; belichtet man die Selenzelle, so geht die Gleichrichterwirkung stark zurück, um bei kräftiger Belichtung vollständig zu verschwinden. Der an Selenzellen im Dunkeln auftretende Gleichrichtereffekt verschwindet also im Lichte mehr oder weniger je nach der Stärke der Belichtung. Bei Abdunkelung stellt sich der Gleichrichtereffekt nicht sofort in voller Stärke wieder ein, er kehrt vielmehr erst rasch, dann immer langsamer gegen seinen ursprünglichen Dunkelwert zurück. Die Selenzelle zeigt also auch in diesem Punkte die bekannte Trägheit.

Wie folgendes Beispiel zeigt, vermochte ich den neuen Effekt, den ich G-Effekt nannte, bei entsprechender Anordnung der Wechselstromvorrichtung bis zu beträchtlicher Stärke zu steigern. Wurde eine Selenzelle mit einer Stromquelle von 4 Volt verbunden, so betrug der Galvanometerausschlag im Dunkeln 5 Skalenteile, bei Tageslicht 15 Teile. Würde aber mit derselben Stromquelle ein Induktor betrieben und die Sekundärrolle mit der Selenzelle und dem Galvanometer verbunden, so entstand im Dunkeln ein Ausschlag von 65 Skalenteilen, der im Tageslicht auf 30 Teile zurückging. Bei Anwendung des höher gespannten Wechselstromes war also der Dunkelstrom etwa 13 mal so groß als bei Gleichstrom. Hohe Spannung setzt demnach den Widerstand des Selens beträchtlich herab; wir kommen somit auf die gleiche Erscheinung, die wir bei Verwendung von Gleichstrom bereits beobachtet und als Spannungseffekt (S. 77) bezeichnet haben. Die Lichtwirkung war bei Verwendung von Wechselstrom größer als bei Gleichstrom, im ersteren Falle betrug sie 35, im 2. Falle 10 Skalateile.

Schaltet man in einen Wechselstromkreis eine kleine Funkenstrecke, so erhält man ebenfalls einen Gleichstrom; schaltet man die Funkenstrecke aus, so verschwindet der Gleichstrom. Eine Belichtung der Selenzelle wirkt also wie das Ausschalten der Funkenstrecke bezw. eines Widerstandes. Das Verschwinden des Gleichrichtereffektes bei Belichtung ist offenbar eine Folge der Widerstandsabnahme des Selens. Dafür sprechen auch folgende Beobachtungen. Je kleiner der Gleichrichtereffekt einer Zelle ist, um so geringer ist der Lichteffekt. Jede Herabsetzung des Gleichrichtereffektes durch äußere Einflüsse hat eine entsprechende Abnahme des G-Effektes zur Folge. Befindet sich in dem Wechselstromkreis der Selenzelle eine noch so geringe Funkenstrecke, so ist eine Bestrahlung der Zelle unwirksam. Das Verschwinden des Gleichrichtereffektes bei Belichtung läßt sich infolgedessen nur bei

einer vollständig intakten Leitung (Sekundärwicklung des Induktors) feststellen.

3. Sendet man durch eine Selenzelle einen Gleich- und einen Wechselstrom, so tritt bei Dunkelheit der Gleichrichter- und Wechselstromeffekt auf; belichtet man die Zelle kräftig, so verschwindet der Wechselstromeffekt zugleich mit dem Gleichrichtereffekt und es ist nur mehr die auf Leitfähigkeitserhöhung des Selens beruhende Zunahme des eingeschalteten Gleichstromes vorhanden. Der Wechselstromeffekt ist eben, wie schon erwähnt, eine Folge des Gleichrichtereffektes; verschwindet nun letzterer bei Belichtung, so tut dies auch der Wechselstromeffekt. Aus der Tatsache, daß Belichtung den Wechselstromeffekt schwächen bezw. ganz zum Verschwinden bringen kann, folgt ohne weiteres, daß es sich bei der Einwirkung von Licht bezw. Wechselstrom auf das Selen nicht um gleichartige Vorgänge handeln kann, wie Greinacher aus seinen Versuchen geschlossen hat.

Nach meinen neueren Versuchen, die noch nicht abgeschlossen sind, scheint der Wechselstromeffekt eine allgemeine Eigenschaft aller Körper von hohem spezifischen Widerstand zu sein und auf einer Überbrückung hoher Widerstände zu beruhen, wie sie in ähnlicher Weise den Teslaströmen eigen ist (S. 235).

Agostini (133), Berndt (202) und Dowell (329) fanden, daß kräftige elektrische Schwingungen den Widerstand des Selens herabzusetzen vermögen; die Rückkehr zum ursprünglichen Wert erfolgt sehr langsam. Demnach käme den elektrischen Wellen die gleiche Wirkung zu als den unsichtbaren Strahlen (S. 181). Da andere Forscher keinen Einfluß der elektrischen Schwingungen auf das Selen finden konnten, wären weitere Versuche auf diesem Gebiete sehr erwünscht.

Amaduzzi (324) beobachtete auch in einem kräftigen Magnetfeld eine Widerstandsänderung des Selens; er vermutet, daß das Selen das negative Hallsche Phänomen zeigt.

XIII. Einfluß der unsichtbaren Strahlungen auf die elektrische Leitfähigkeit des Selens.

Die unsichtbaren Strahlen, wie sie von Röntgenröhren, radioaktiven Substanzen und sonstigen Stoffen ausgehen, vermögen in ähnlicher Weise auf die Selenzellen einzuwirken wie die sichtbaren Lichtstrahlen. Während jedoch der Einfluß des sichtbaren Lichtes auf das Selen hauptsächlich in einer Oberflächenwirkung besteht, tritt hier die Tiefenwirkung

mehr in die Erscheinung, da den unsichtbaren Strahlen teilweise ein großes Durchdringungsvermögen zukommt. Je nach der Größe dieses Durchdringungsvermögens oder, wie wir auch sagen, je nach der Härte der Strahlen wird natürlich der zeitliche Verlauf der Erscheinung sich verschieden gestalten.

Die Einwirkung der Röntgenstrahlen auf den elektrischen Widerstand des Selens wurde zuerst von Giltay (129) beobachtet. Genauere Messungen hat erst Athanasiadis (300) angestellt. Er fand, daß die Abhängigkeit des Selenwiderstandes von der Röntgenstrahlintensität durch dasselbe Gesetz ausgedrückt werden kann wie die Abhängigkeit des Widerstandes von der Stärke des natürlichen Lichtes, und daß somit die Formel (S. 98)

$$i = k\ (k—a)\ b,$$

welche die Beziehung zwischen der Beleuchtungsintensität i und dem Leitvermögen k der Selenzelle angibt, auch für die Röntgenstrahlung gilt. Daraus folgt, daß die Intensität der Röntgenstrahlung wie die des Lichtes im umgekehrten Verhältnis zum Quadrat der Abstände steht.

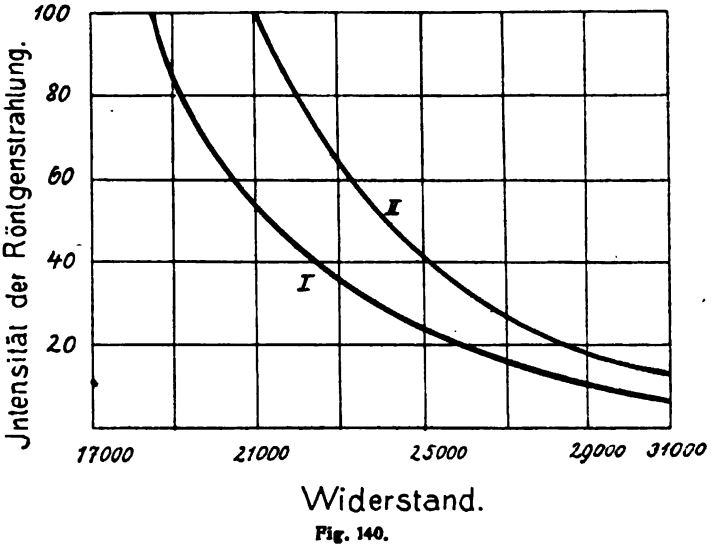


Fig. 140.

Die Kurven I und II in Fig. 140 veranschaulichen die Abhängigkeit des Widerstandes von der Strahlungsintensität, wie sie Athanasiadis festgestellt hat; auf der Abszisse sind die Selenwiderstände, auf der Ordinate die Intensitäten aufgetragen. Die Kurvenform stimmt im allgemeinen mit der für gewöhnliches Licht gefundenen (S. 98) überein. Die Wirkung der Röntgenstrahlung ist geringer, aber durchgreifender,

die Trägheit und Ermüdung noch weiter ausgeprägt als bei Belichtung mit natürlichem Lichte. Die maximalen Werte der Leitfähigkeit bei Bestrahlung wurden von Athanasiadis in der Weise gewonnen, daß mit der Ablesung immer so lange gewartet wurde, bis die Zelle einen annähernd konstanten Widerstand angenommen hatte. Dies nimmt bei Bestrahlung mit Röntgenlicht noch längere Zeit (20—30 Minuten) in Anspruch als bei Belichtung mit sichtbaren Strahlen; auch geht die Erholung nach der Bestrahlung noch weit langsamer vor sich. Diese Erscheinung findet ihre Erklärung zweifellos durch das große Durchdringungsvermögen der Röntgenstrahlen, durch die auch die tieferen Schichten beeinflußt werden. Die große Ähnlichkeit im zeitlichen Verlauf der Widerstandsänderungen, wie wir sie bei andauernder Bestrahlung mit natürlichem Licht bezw. mit den durchdringenden Röntgenstrahlen erhalten, bietet eine kräftige Stütze für die Annahme, daß auch den natürlichen Lichtstrahlen eine Tiefenwirkung zukommt und daß die Trägheits- und Ermüdungserscheinungen eben auf dieser Tiefenwirkung beruhen.

Während bei den meisten Selenzellen die Leitfähigkeit kurz nach dem Auftreffen der Licht- bezw. Röntgenstrahlen großen Veränderungen unterworfen ist, besitzt ein von Fürstenau (440, 463) hergestellter Röntgenzellentyp die Eigenschaft, daß die Leitfähigkeit das Maximum fast momentan mit dem Auftreffen der Röntgenstrahlen annimmt, diesen Wert längere Zeit beibehält und dann erst allmählich abfällt. Der zeitliche Verlauf der Leitfähigkeitsänderungen, wie sie eine Fürstenausche Zelle bei Bestrahlung mit Röntgenlicht zeigt, wird durch die in Fig. 141 gezeichnete Kurve ungefähr veranschaulicht.

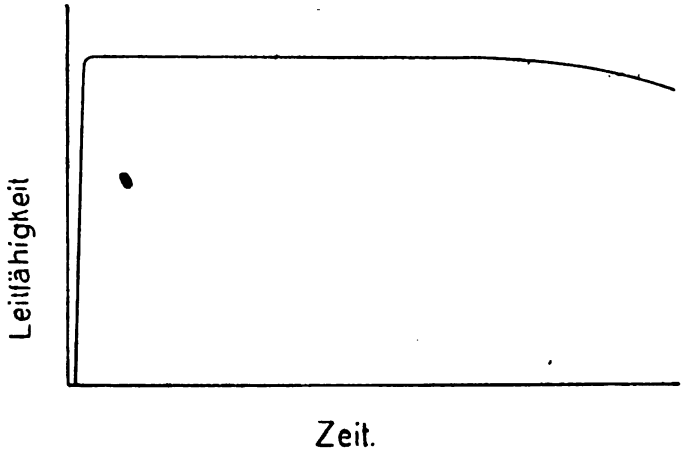


Fig. 141.

Mayer (467) hat an den Fürstenauschen Zellen die interessante Beobachtung gemacht, daß die Zeitdauer, während der die maximale Leitfähigkeit konstant bleibt, um so größer ausfällt, je geringer die angewendete Lichtintensität ist, und daß das Produkt aus Belichtungszeit und Lichtstärke für die konstante Periode eine konstante Größe darstellt. Die beiden Kurven in Fig. 142 zeigen ungefähr die Leitfähigkeits-

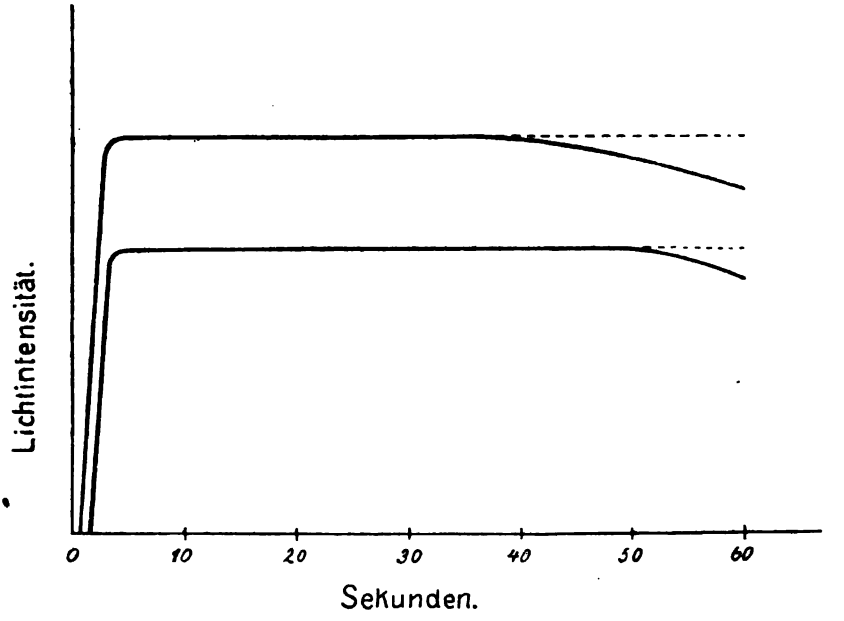


Fig. 142.

änderungen während einer 60 Sekunden dauernden Bestrahlung a) mit schwächerem, b) mit stärkerem Röntgenlicht; das Abfallen der Kurve wurde etwas übertrieben dargestellt.

Was die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Strahlenintensität betrifft, so fand Fürstenau an seinen Zellen direkte Proportionalität der beiden Größen. Die Resultate der Messungen an drei Zellen sind in Fig. 143 wiedergegeben. Auf der Abszisse wurden die Leitfähigkeiten, auf der Ordinate die Strahlenintensitäten aufgetragen.

Zum Schlusse sei noch darauf hingewiesen, daß die Fürstenausche Zelle zum Zwecke der Röntgenstrahlenmessung (S. 263) hergestellt wird, daß sie sich aber in ähnlicher Weise auch für Lichtmessungen eignet.

Setzt man eine Selenzelle den Strahlen eines radioaktiven Präparates aus, so erhält man eine ähnliche, aber natürlich

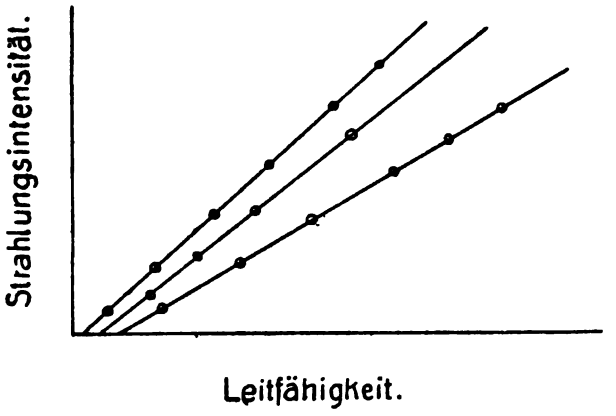


Fig. 143.

schwächere Wirkung wie bei Verwendung einer Röntgenröhre. Der zeitliche Verlauf der Leitfähigkeitsänderungen bei andauernder Bestrahlung ist in hervorragendem Maße von der Zusammensetzung der Strahlung abhängig. Die Strahlen der radioaktiven Stoffe z. B. die Radiumstrahlen bestehen bekanntlich aus 3 Strahlengattungen, den α-, β- und γ-Strahlen, die ihrer Natur nach sehr verschieden sind und insbesondere ein recht verschiedenartiges Durchdringungsvermögen besitzen, so daß je nach der Zusammensetzung die Tiefenwirkung mehr oder minder in die Erscheinung tritt.

Bloch (148) ließ ein Radiumpräparat auf eine Selenzelle in 1 mm Entfernung einwirken, wobei das Phosphoreszenzlicht durch schwarzes Papier abgeblendet war. Der Widerstand der Selenzelle, der im Dunkeln 30100 Ohm betrug, nahm im diffusen Licht um ca. 900 Ohm, im Lichte einer Glühlampe um 15000 Ohm, unter dem Einflusse des Radiumpräparates um 800 Ohm ab. Der Widerstand stieg nach der Entfernung des Präparates nur sehr langsam.

Brown und Stebbins (270) beobachteten an einer Selenzelle, unter dem Einflusse der β-Strahlung, die bekanntlich aus fortgeschleuderten Elektronen besteht, eine bis zu 33 % betragende Abnahme des Widerstandes. Die Erholung der Zelle nahm ungefähr fünfmal soviel Zeit in Anspruch wie nach einer Bestrahlung mit natürlichem Lichte.

Eine Widerstandsabnahme bewirken auch bei direkter Bestrahlung die phosporeszierenden Substanzen (Obach 45, Himstedt 145, Bonola 326), kohlensaures Barium, Wasserstoffsuperoxyd, Terpentinöl, mit Ozon behandelte Körper, die von demselben angegriffen werden z. B. Kautschuk und Kampfer (Bloch 148, Aubel 183, Brown und Stebbins

304), ferner alkoholische Lösungen einiger pflanzlichen und tierischen Pigmente (Griffiths 186).

Ein Blatt aus rotem Kautschuk, das 12 Sekunden in einem Strom trockenen Ozons gelegen hatte, wirkte auf eine Selenzelle im Dunkeln derartig, daß nach 15 Minuten langem Exponieren der Widerstand der Zelle von 599 000 auf 556 000 Ohm sank. Ein Messingschirm zwischen Kautschuk und Zelle bewirkte, daß der Widerstand nach 1 Stunde auf 563 000 Ohm stieg. Der Widerstand nahm nur ganz langsam seinen ursprünglichen Wert an. Eine ähnliche Wirkung zeigten Kampferstücke, die 25 Minuten lang einem Strome trockenen Ozons ausgesetzt waren. Der Widerstand fiel innerhalb 15 Minuten von 591 000 Ohm auf 510 000 und wuchs nach dem Einschalten des Messingschirmes innerhalb einer Stunde auf 534 000 Ohm an; am folgenden Tage hatte die Zelle den ursprünglichen Widerstand wieder angenommen (Aubel 182).

Eine Selenzelle wurde über einem Porzellanbecken, das 30 % iges Wasserstoffsuperoxyd enthielt, angebracht und zwar ungefähr 3 cm über der Flüssigkeitsoberfläche. Unter der Einwirkung der vom Wasserstoffsuperoxyd ausgehenden Strahlen sank der Widerstand von 496 000 Ohm in 3—4 Minuten auf 324 000 Ohm. Beim Einschalten eines Messingschirmes zwischen Zelle und Substanz stieg der Widerstand nur ganz langsam bis zu seinem ursprünlichen Wert wieder an. Wurde Terpentinessenz in das Porzellanbecken gebracht und der Versuch wiederholt, so fiel der Widerstand von 461 000 auf 386 000 Ohm innerhalb 15 Minuten. Die Widerstandsverringerung erfolgte noch viel langsamer als bei dem vorigen Versuch, dasselbe galt von der Rückkehr zum ursprünglichen Wert (Aubel 183).

Dony-Henault (184) fand, daß die Verminderung des Widerstandes einer Selenzelle in der Nähe von H_2O_2-Lösungen durch eine Änderung der Oberfläche des Selens infolge der Dämpfe des H_2O_2 (Wasserstoffsuperoxyds) bewirkt wird. Schließlich sei noch auf die Versuche von Ries (315, 383) hingewiesen, der Selenzellen dicht über einer Wasserfläche anbrachte und eine allmähliche, aber ziemlich beträchtliche Widerstandsabnahme infolge Aufnahme von Feuchtigkeit durch die Selenzelle beobachtete. Man wird daher bei Versuchen mit wasserhaltigen Flüssigkeiten den Einfluß der Feuchtigkeit in Rechnung ziehen müssen.

XIV. Thermoelektrische Kraft und Wärmeleitfähigkeit des Selens.

Die thermoelektrische Kraft des Selens wurde zuerst von Matthiessen (9) bestimmt; er fand den außerordentlich hohen Wert von 805 Mikrovolt bei 20° C, so daß das Selen an das äußerste Ende der thermoelektrischen Spannungsreihe zu stehen kam. Righi (9) bestimmte die thermoelektrische Kraft des Selens zwischen Bleielektroden zu 0,506 Mikrovolt; nach ihm hat die thermoelektrische Kraft des Selens von Zimmertemperatur bis zum Schmelzpunkt fast linearen Verlauf. Weidert (234) erhielt für metallisches Selen die Werte 1129 Mikrovolt gegen Platin, 1130 gegen Blei. Nach Pelabon (445, 446) besitzen Selen-Antimonlegierungen sowie Selen-Zinnlegierungen besonders gute thermoelektrische Wirkung.

Weidert (234) beobachtete bei Belichtung des Selens eine Abnahme der thermoelektrischen Kraft um 3—4 %. Natürlich steht diese Änderung im Zusammenhang mit der Widerstandsabnahme des Selens bei Bestrahlung. Die Beziehungen zwischen der Abnahme der thermoelektrischen Kraft und der des Widerstandes konnten bei der Kleinheit des Effektes nicht mit Sicherheit festgestellt werden. Bei Verdunkelung des Präparates trat wieder eine Vergrößerung der thermoelektrischen Kraft ein.

In den Metallen besteht zwischen Wärmeleitfähigkeit und elektrischer Leitfähigkeit eine enge Beziehung, indem die Wärmeleitfähigkeit proportional der elektrischen Leitfähigkeit ist. Da nun die elektrische Leitfähigkeit des Selens unter dem Einflusse des Lichtes beträchtlich wächst, so müßte man erwarten, daß auch die Wärmeleitfähigkeit im Lichte eine Steigerung erfährt. Tatsächlich haben Bellati und Lussana (91) sowie Pochettino und Trabacchi (287) eine geringe Zunahme der Wärmeleitfähigkeit bei Bestrahlung des graukristallischen Selens feststellen können. Ein Versuch von Sieg (472) an einem Selenkristall eine Änderung in der Wärmeleitfähigkeit mit Änderung der Beleuchtungsstärke zu finden, führte zu einem negativen Resultat, indem seine Versuchsergebnisse innerhalb der Beobachtungsgenauigkeit von 5 % schwankten.

XV. Selenelemente.

Belichtet man von 2 lichtempfindlichen in einen Elektrolyt tauchenden Elektroden (Fig. 144) die eine, so entsteht im allgemeinen ein Strom, der in dem Elektrolyt von der beschatteten zur belichteten Elektrode fließt; letztere wird also elektronegativ. Die Wirkung ist in erster Linie von der Beschaffenheit der Elektrode abhängig und tritt besonders deutlich auf, wenn die belichtete Elektrode

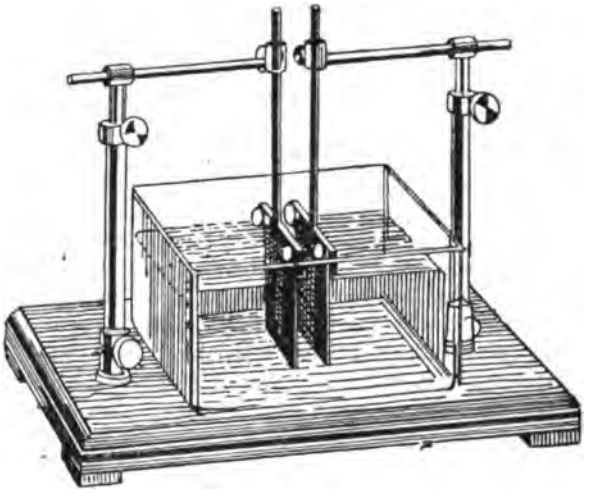


Fig. 144.

mit einer dünnen kristallinischen Selenschicht überzogen ist. Wir heißen eine derartige Zelle ein galvanisches (elektrolytisches) Selenelement. Die Lichtwirkung vollzieht sich offenbar an der Grenze Selen-Elektrolyt. Die feine Selenschicht ist beiderseits von je einem Leiter begrenzt, auf der einen Seite von der Metallunterlage, auf der anderen von dem Elektrolyt. Ersetzt man den Elektrolyt durch einen festen Leiter z. B. durch eine durchsichtige Metallfolie, so daß die dünne Selenschicht zwischen 2 Metallen eingeschmolzen ist, so hat man ein festes Selenelement, das bei Bestrahlung der Selenschicht durch die durchsichtige Metallfolie hindurch einen lichtelektrischen Strom von derselben Richtung zeigt. Wiewohl die Erscheinung in beiden Zellenarten offenbar ihrem Wesen nach vollkommen gleich ist, wollen wir doch beide gesondert behandeln.

a) Galvanische (elektrolytische) Selenelemente.

Ein dünnes Platinblech wird auf der einen Seite mit einer feinen kristallinischen Selenschicht, auf der anderen mit einer isolierenden Substanz z. B. mit Paraffin oder Asphaltlack überzogen. Zur Herstellung möglichst dünner Selenschichten bedient man sich der auf Seite 51 beschriebenen Methoden. Diese Selenelektrode stellt man in 3,12 prozentiger schwefliger Säure einer blanken Platinelektrode gegenüber. Letztere bringt man entweder schief an, damit die Lichtstrahlen möglichst senkrecht auf die Selenelektrode auffallen können oder man verwendet ein Drahtnetz, durch das die lichtempfindliche Schicht bequem belichtet werden kann.

Ein derartiges Element besitzt bereits im Dunkeln eine schwache elektromotorische Kraft. Bei Belichtung entsteht ein photoelektrischer Strom, der immer in der Richtung der Lichtstrahlen, also im Elektrolyt von der beschatteten zur bestrahlten Elektrode fließt. War nun die Elektrode schon im Dunkeln elektronegativ, so wird sie bei Bestrahlung noch stärker elektronegativ; war sie aber elektropositiv, so wird sie bei Bestrahlung schwächer elektropositiv oder sogar elektronegativ. Wir haben es also hier mit einer direkten Erregung einer elektromotorischen Kraft und nicht mit einer bloßen Leitfähigkeitsänderung zu tun.

Bei andauernder Bestrahlung bleibt der Effekt im allgemeinen nicht konstant, sondern nimmt erst rasch, dann langsamer ab; bisweilen kann man ein Abfallen der elektromotorischen Kraft bis zum ursprünglichen Dunkelwert beobachten (Fig. 145 Kurve a und b). Man darf indes nicht annehmen, daß die Lichtempfindlichkeit der Zelle während der Bestrahlung so stark abgenommen habe oder vielleicht ganz verschwunden sei; der lichtelektrische Strom ist vielmehr nur überdeckt durch einen entgegengesetzt gerichteten Polarisationsstrom, der den lichtelektrischen Strom herabdrückt. Hebt man die Belichtung auf, so zeigt sich denn auch eine sofortige Abnahme (Fig. 145) der elektromotorischen Kraft, die nur durch das Ausscheiden des Lichteffektes erklärt werden kann.

Das erste elektrolytische Selenelement hat Sabine (31) konstruiert. Später hat sich Minchin (126) damit beschäftigt, möglichst lichtempfindliche Selenelemente zu astronomischen Zwecken zu bauen. Fig. 146 zeigt eine Zelle von Minchin. In ein Glasgefäß ragt seitlich ein Glasröhrchen, in das ein Aluminiumdraht P_1 eingeschmolzen ist. Der Aluminiumdraht steht in leitender Verbindung mit einer dünnen Selenschicht, die sich in nächster Nähe eines Quarzfensters Q befindet. Von unten ragt ein Platindraht P_2 als 2. Elektrode in das mit Önanthol gefüllte Gefäß. Belichtet man durch das Quarz-

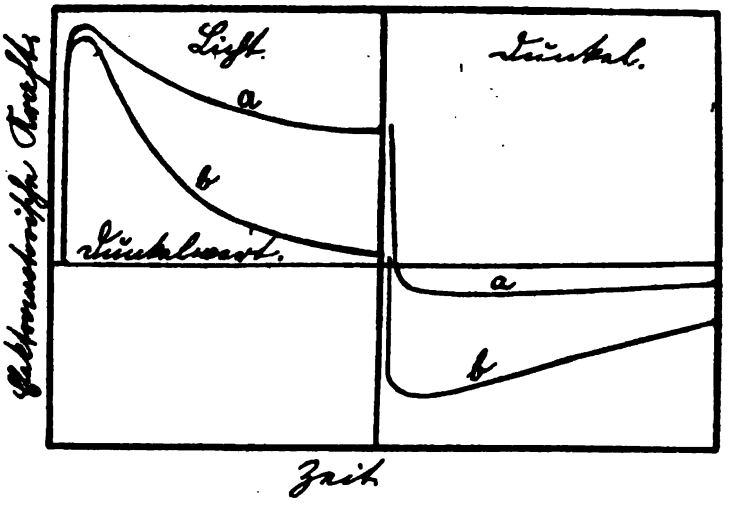


Fig. 145.

fenster die Selenschicht, so wird diese zum positiven Pol. Die Zelle erwies sich für alle Strahlen vom Ultrarot bis Ultraviolett empfindlich, besaß ein Empfindlichkeitsmaximum im Gelb, reagierte aber auch auf blaue und violette Strahlen noch in auffallender Stärke. Die durch das Licht erzeugte elektromotorische Kraft war proportional der Quadratwurzel aus der Beleuchtungsstärke. Die Haltbarkeit der Zelle war sehr groß, wenn auf eine gute Dichtung zwischen Glasrohr und Aluminium, damit keine Flüssigkeit eindringen kann, und auf guten Luftabschluß des Gefäßes besonders geachtet wurde.

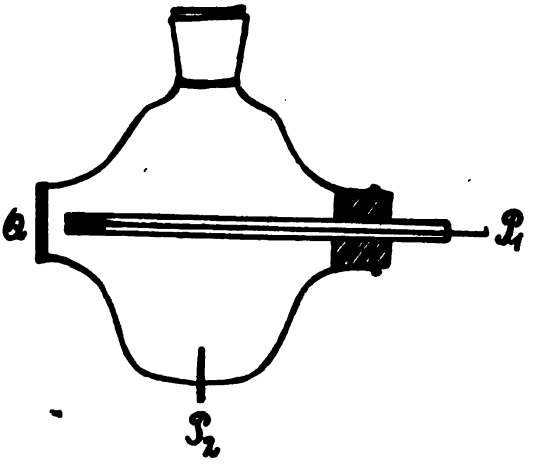


Fig. 146.

Ich (313) habe den Einfluß der Polarisation auf den lichtelektrischen Effekt untersucht, indem ich eine Selenelektrode in einem Elektrolyten einer blanken Metallelektrode gegenüberstellte und zeitweise eine Stromquelle einschaltete. Zuerst wurde der lichtelektrische Effekt ohne Polarisation gemessen. Dann wurde die Selenelektrode mit dem positiven Pol der Stromquelle verbunden, wobei eine Spannung von 0,2 Volt in Anwendung kam. Nachdem der Strom einige Minuten durch die Zelle gegangen war, wurde die Stromquelle ausgeschaltet und der lichtelektrische Effekt gemessen. Hierauf ruhte die Selenelektrode in der Dunkelheit aus, um nachher bei einer um 0,2 Volt höheren Spannung gleich lange Zeit polarisiert zu werden. Die Versuchsreihe wurde bis 2,2 Volt bei positiver und dann ebenso bei negativer Polarisation durchgführt. Die beiden Kurven in Fig. 147 veranschaulichen die Abhängig-

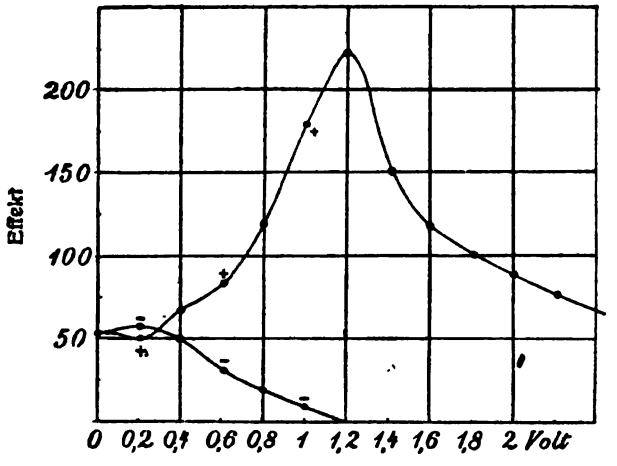


Fig. 147.

keit des Effektes von der Polarisation. In horizontaler Richtung ist die angelegte Spannung, in dazu senkrechter Richtung der lichtelektrische Effekt aufgetragen. War die Selenelektrode vorher mit dem positiven Pol verbunden, so begünstigte schwache Polarisation den Effekt bedeutend; bei 1,2 Volt trat ein Maximum der Wirkung ein, worauf die Empfindlichkeit wieder ziemlich rasch abnahm. Negative Polarisation setzte den Effekt herab und hob ihn schließlich ganz auf. Auffallend ist der direkt entgegengesetzte Verlauf der beiden Kurven; dem Maximum des Effektes bei 1,2 Volt entspricht ein Minimum bei negativer Polarisation. Von besonderer Wichtigkeit ist die Tatsache, daß Polarisation wohl auf die

Stärke, niemals aber auf die Richtung des photoelektrischen Stromes einen Einfluß hat. Schließlich möchte ich nicht unterlassen, darauf hinzuweisen, daß die Polarisation den lichtelektrischen Effekt in ähnlicher Weise beeinflußt wie die Elektrisierung in freier Luft den Hallwachseffekt (S. 199). In beiden Fällen steigerte positive Polarisation bezw. Elektrisierung die Lichtempfindlichkeit ganz beträchtlich, während negative sie herabdrückte. Dies berechtigt zu der Annahme, daß beide Effekte auf ähnlichen Vorgängen beruhen; tatsächlich werden wir später sehen, daß in beiden Fällen unter dem Einflusse des Lichtes Elektronen von dem bestrahlten Körper abgetrennt werden.

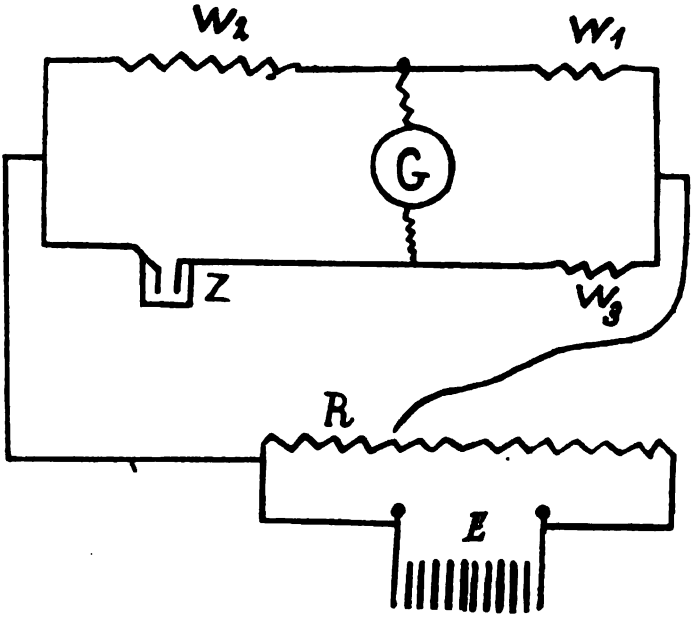


Fig. 148.

Reinganum (254) vermochte durch Anlegen eines Hilfspotentials während der Bestrahlung die Empfindlichkeit beträchtlich zu steigern. War die Selenelektrode mit dem negativen Pol verbunden, so bewirkte die Belichtung eine Zunahme der Stromstärke, bei positivem Potential der Selenelektrode dagegen eine Abnahme des Effektes. Zu dem Versuch wurde die in Fig. 148 abgebildete Schaltung verwendet. Von dem Akkumulator E wird mittels des Vorschaltwiderstandes R ein beliebiger Teil der Spannung abgezweigt; bei Z liegt das Selenelement, in der Brücke das Galvanometer G. Die Widerstände

W_1, W_2, W_3 werden so abgeglichen, daß bei Verdunkelung der Zelle kein Strom durch G fließt. Bei dem geringsten Lichtschein schlägt dann das Galvanometer aus. Die Abhängigkeit des Effektes von der Größe der angelegten Spannung, wie sie Reinganum beobachtete, ist in Fig. 149 graphisch dargestellt. Auf der Abszisse ist die angelegte Spannung, auf der Ordinate der beobachtete Effekt aufgetragen. Das Maximum der Empfindlichkeit liegt bei —0,506 Volt, wo die Stromstärke auf den 27fachen Wert bei Bestrahlung ansteigt. Die Versuche von Reinganum bestätigen das Gesetz über die Richtung des photoelektrischen Stromes. Die von ihm bei

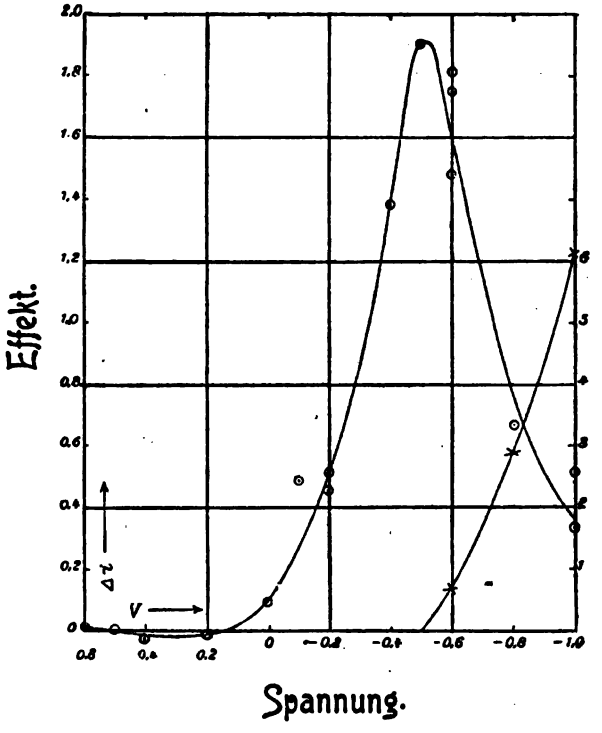


Fig. 149.

einigen positiven Potentialen beobachtete Stromzunahme erklärt sich durch Leitfähigkeitsänderungen unter dem Einflusse des Lichtes; sie tritt nur da auf, wo die äußere elektromotorische Kraft groß ist gegen die durch das Licht erregte. Die Trägheit war im allgemeinen recht gering, was teilweise auf die Konstruktion der Zelle (S. 137), teilweise auf die Anlegung der Spannung zurückzuführen ist.

Glatzel (375) bemühte sich hochempfindliche, trägheitslose Selenelemente nach dem Verfahren von Reinganum herzustellen. Er überzog ein Platinblech mit einer möglichst feinen Selenschicht und stellte diese Selenelektrode in 3,12-prozentiger schwefliger Säure einer blanken Platinelektrode gegenüber. Er erhielt bei der eben beschriebenen Schaltung und bei Belichtung mit einer Nernstlampe von 110 Volt, 1 Amp. eine Stromänderung von ca. 1,5 Milliamp. Während dieses Element fast ganz trägheitslos war, besaß ein anderes in gleicher Weise hergestelltes, bei dem die schweflige Säure einige Tage alt war, merkliche Trägheit. Ebenso zeigte ein anderes Selenelement mit Kohlenelektroden trotz gleicher Herstellung ausgesprochene Trägheit.

Die schweflige Säure kann bei diesen Zellen durch Salzsäure ersetzt werden. Man kann dann das Selenelement dadurch in einen festen Zustand überführen, daß man der Salzsäure Wasserglas zusetzt, wodurch sich festes salzsäurehaltiges Kieselsäurehydrat bildet. Nicht unerwähnt soll bleiben, daß letzteres die Lichtstrahlen stärker absorbiert als der flüssige Elektrolyt.

Pélabon (360) stellte einer reinen Antimonelektrode eine mit Selen legierte Antimonelektrode in einer salzsauren Lösung von Antimontrichlorid gegenüber. Das Element zeigte bei Belichtung des Selenantimonbleches wesentliche Änderungen der elektromotorischen Kraft. Pélabon untersuchte den lichtelektrischen Effekt solcher Zellen sowohl bei offenem, als auch bei geschlossenem Stromkreis. In letzterem Falle betrug der Dunkelwert der elektromotorischen Kraft ungefähr ein Drittel von derjenigen bei offenem Stromkreis. Beleuchtung verursachte bei geschlossenem Stromkreis eine größere Änderung der elektromotorischen Kraft als bei offenem Stromkreis. Der Verlauf der Erscheinung war in beiden Fällen nicht sehr verschieden, die Trägheit bedeutend. Von den Selenantimonblechen erwiesen sich diejenigen am empfindlichsten, die sehr wenig Selen enthielten. Alle Selen-Antimonzellen waren unempfindlich für ultraviolette Strahlen, nur wenig empfindlich für violette, stark erregbar für gelbes und rotes Licht.

b) Feste Selenelemente.

Ein festes Selenelement erhält man durch Einschmelzen einer möglichst feinen Selenschicht zwischen zwei durchsichtigen Platinspiegeln. Zu diesem Zwecke versieht man Glasplatten auf einer Seite mit feinen Platinüberzügen, schmilzt auf einen solchen Platinniederschlag eine recht dünne Selenschicht auf und drückt auf diese in heißem Zustande eine zweite platinierte Glasplatte. Da sich die Glasplatten von der

Selenmasse nach dem Kristallisieren leicht ablösen, an der amorphen Selenschicht aber gut haften, muß man nach dem Einschmelzen des Selens, aber vor der Kristallisation die zwei Spiegel durch eine Vorrichtung fest gegeneinander pressen. Das amorphe Präparat wird ca. 2 Stunden auf 195—200° gehalten und langsam gekühlt; dabei gelingt es nicht immer wirklich lichtelektrisch erregbare Präparate herzustellen.

Das Auftreten einer elektromotorischen Kraft bei Belichtung einer Selenzelle wurde zuerst von Adams und Day (23) beobachtet. Die oben angegebene Form des festen Selenelementes stammt von Fritts (78) und Uljanin (98); sie hat den großen Vorteil, daß man den ganzen Kontakt von Selen und Metall auf jeder Seite beleuchten kann. Die größte elektromotorische Kraft, die Uljanin bei Bestrahlung mit Sonnenlicht erhielt, betrug 0,12 Volt; der stärkste Strom bei einem Galvanometerwiderstand von 6000 Ohm $1{,}6 \cdot 10^{-5}$ Amp. In den ersten Tagen nach der Herstellung sank die Empfindlichkeit stets bedeutend und gleichzeitig wuchs der Widerstand. Diese Änderung beobachtete Uljanin bei allen Präparaten. Wenn die Zellen konstant geworden waren, betrug der durch Sonnenlicht erzeugte Strom durchschnittlich $8 \cdot 10^{-7}$ Amp.

Righi (97) stellte elektromotorisch wirksame Präparate dadurch her, daß er auf eine horizontale Glasplatte ein Drahtnetz und auf dieses eine mit Selen an der unteren Fläche bedeckte Messingplatte legte. Letztere wurde mit Gewichten entsprechend belastet. Die Belichtung erfolgte von unten mittels Spiegel. Derartige Zellen zeigten meist schon im Dunkeln einen schwachen Strom; bei Bestrahlung mit Gaslicht erhielt Righi elektromotorische Kräfte von 0,085—0,115 Volt, mit Sonnenlicht etwa $1\frac{2}{3}$ mal so große Wirkungen.

Die wichtigsten Eigenschaften eines festen Selenelementes sind kurz zusammengefaßt folgende:

1. Die Selenelemente zeigen im Dunkeln keine elektromotorische Kraft, wenn sie trocken sind und die Selenschicht fest an den Elektroden haftet. Bei Belichtung entsteht ein Strom, der vollständig konstant bleibt und bei Verdunkelung ohne Rest verschwindet.

2. Der lichtelektrische Strom fließt stets in der Richtung des Lichtes, d. h. von der belichteten Elektrode durch das Selen zur beschatteten. Durch gleichzeitige Belichtung beider Elektroden wird daher der Effekt geschwächt bezw. ganz aufgehoben. Die Natur der Elektroden ist ohne Einfluß auf die Richtung des Stromes.

3. Im allgemeinen zeigen die Präparate mit hohem Widerstand den größten Effekt. Mit der Zeit nimmt Widerstand und lichtelektrische Erregbarkeit ab. Durch nochmaliges Er-

hitzen kann die Empfindlichkeit wieder gesteigert werden. Wechselströme vermögen Widerstand und Erregbarkeit bedeutend zu erhöhen. Chiarini (327) erhielt auch unter der Einwirkung von elektromagnetischen Wellen einen lichtelektrischen Strom.

4. Die am meisten erregbaren Präparate zeigen keine oder nur schwache Polarisation. Die stark polarisierbaren Präparate sind entweder feucht oder es haftet die Selenschicht nicht fest an den Elektroden; solche Elemente besitzen meist schon im Dunkeln eine elektromotorische Kraft.

5. Bei schwacher Beleuchtung wächst der Strom proportional mit der Lichtstärke, bei stärkerer Beleuchtung langsamer als diese.

6. Alle feuchten Zellen zeigen bereits im Dunkeln schwache Ströme, deren Richtung von der Natur der Elektroden abhängig ist. Bei Belichtung kann man recht verschiedenartige Wirkungen beobachten. Häufig lagern sich nämlich in solchen Zellen 2 Wirkungen über einander, indem neben einer Leitfähigkeitserhöhung des Selens auch lichtelektrische Ströme wie in galvanischen Zellen auftreten. Auch spielt die Polarisation eine große Rolle. Bei stärkerer Polarisation bewirkt das Licht stets Abnahme des Polarisationsstromes. (Kalischer 90, 96, 101; Uljanin 98, 99; Righi 97, 103; Ries 171, 313, 315).

XVI. Die lichtelektrische Zerstreuung am Selen.

Negativ geladene oder auch neutrale Körper verlieren bei Bestrahlung mit ultraviolettem Lichte negative Elektrizität, während eine positive Ladung im allgemeinen nicht beeinflußt wird. Dabei ist es notwendig, daß die Lichtstrahlen den Körper selbst treffen; eine Bestrahlung des ihn umgebenden Gases hat keine Wirkung. Wir nennen diese Erscheinung lichtelektrische Zerstreuung oder nach ihrem Entdecker Hallwachseffekt. Die Abgabe negativer Elektrizität kommt dadurch zustande, daß aus dem belichteten Körper Elektronen herausgeschleudert werden. Unter dem Einflusse der ultravioletten Strahlung werden im Körper diejenigen Elektronen, deren Schwingungsperiode mit der Periode des einfallenden Lichtes übereinstimmt, zum Mitschwingen angeregt, vom Atom losgelöst und an die Umgebung abgegeben.

Fig. 150 zeigt eine einfache Versuchsanordnung zum Nachweise der lichtelektrischen Zerstreuung. Die wohl iso-

lierte Zinkplatte Z wird negativ geladen und durch einen Draht mit dem Elektroskop E verbunden; letzteres zeigt durch den Ausschlag der Blättchen die auf Z herrschende elektrische Spannung an. Fallen nun Strahlen der Quecksilberbogenlampe L auf die Zinkplatte, so wird diese rasch entladen, wie man aus dem Zurückgehen des Ausschlages am Elektroskop deutlich ersehen kann. Eine andere Versuchsanordnung besteht darin, daß man der Zinkplatte ein Drahtnetz gegenüberstellt, die Zinkplatte mit dem negativen Pol, und das

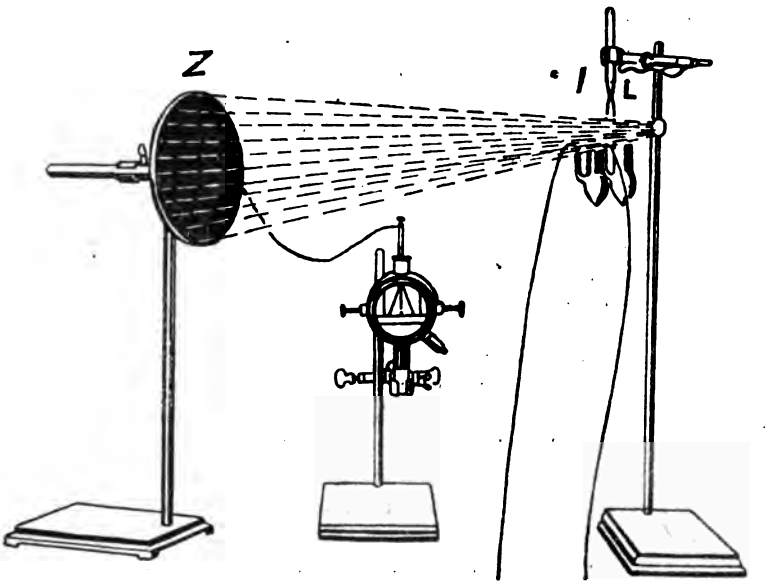


Fig. 130.

Drahtnetz mit dem positiven Pol einer starken Batterie unter Einschaltung eines Galvanometers verbindet. Bestrahlt man dann die Zinkplatte, so gehen Elektronen von der belichteten Platte auf das Drahtnetz über und das Galvanometer zeigt einen dauernden schwachen Strom, den lichtelektrischen Effekt, an. Der lichtelektrische Strom ist proportional der belichteten Fläche und der Lichtstärke; bei Vergrößerung der Spannung wächst er langsam bis zu einem Maximum an. Wird die Bestrahlung längere Zeit fortgesetzt, so nimmt die lichtelektrische Empfindlichkeit erst rasch, dann langsam ab; wir nennen diese Erscheinung Ermüdung.

Der erste, der über die lichtelektrische Zerstreuung am Selen berichtete, war Schmidt (131). Er beobachtete große lichtelektrische Zerstreuung, gibt aber keine genauen Werte

an. Sehr eingehende Versuche hat Gyulai Zoltán (413) angestellt; wir wollen die von ihm gefundenen recht interessanten Resultate uns etwas näher ansehen.

Die Herstellung der Selenpräparate geschah in folgender Weise. Ein Metallblättchen von 3 cm Durchmesser wurde bis zum Schmelzpunkt des Selens erhitzt, dann Selen aufgeschmolzen und geglättet, damit die Oberfläche möglichst spiegelnd wurde. Hierauf erfolgte die Abkühlung der Scheibe durch Auflegen auf eine kalte Bleiplatte. Zum Zwecke der Kristallisation wurde das amorphe Präparat 5—6 Stunden auf 200—210° gehalten und dann abgekühlt, was 15—12 Minuten in Anspruch nahm.

Die Versuchsanordnung war folgende. In einem zur Erde abgeleiteten Metallkasten war ein Blech angebracht, das mit dem negativen Pol einer Batterie verbunden war; während der positive Pol mit der Erde in Verbindung stand. Auf dieses Blech, das durch eine seitliche Öffnung im Kasten von einer Quecksilberlampe belichtet werden konnte, wurde das Metallscheibchen mit der Selenschicht aufgesetzt. Über dem Scheibchen war ein Blechdiaphragma mit einer Öffnung von 2,6 cm angebracht, damit immer eine gleich große Fläche belichtet wurde. Damit das Diaphragma selbst nicht an der lichtelektrischen Zerstreuung teilnehme, wurde es mit Paraffin überzogen. Der Selenschicht stand in 6,7 cm Entfernung eine Platte gegenüber, die mit einem Quadrantelektrometer in Verbindung war. Diese Platte bildete mit der gegenüberliegenden Selenschicht zusammen einen Kondensator. Die lichtelektrischen Ströme wurden durch die Aufladung der mit dem Elektrometer verbundenen Kondensatorplatte gemessen.

a) Versuche mit kristallinischem Selen:

Die lichtelektrische Empfindlichkeit am kristallinischen Selen schwankte zwischen 1,6 und 2,1; sie betrug also ungefähr 1/3 der lichtelektrischen Zerstreuung des geschmirgelten Zinks. Die Schwankungen führt Gyulai auf die durch den Ozongehalt der Luft verursachte Ermüdung zurück. Bezüglich der Ermüdung unterscheidet sich das kristallinische Selen ganz bedeutend von den Metallen und anderen Körpern, indem die lichtelektrische Empfindlichkeit des Selens in der Atmosphäre dauernd ansteigt, während Metalle in freier Luft große Ermüdung zeigen. Dieses Anwachsen des lichtelektrischen Effektes in der Atmosphäre wird noch begünstigt, wenn man das Selen während der ultravioletten Bestrahlung dem (sichtbaren) Lichte aussetzt. Die Empfindlichkeit nähert sich demnach in freier Luft einem Maximum, erreicht aber dieses offenbar im Lichte schneller als im Dunkeln.

Wird die Selenschicht vor der Bestrahlung elektrisiert, so zeigt sie wesentlich andere Eigenschaften. Die Elektrisierung wurde in einer Entladungsröhre vorgenommen, wobei die Selenschicht die eine Elektrode bildete, während ihr als zweite Elektrode eine Aluminiumplatte gegenüberstand. Zwischen ihnen befand sich ein Glimmerplättchen, damit der Transport materieller Teilchen zur Selenelektrode verhindert wurde. Nachdem die Röhre auf ca. 1 mm evakuiert war, wurden die beiden Elektroden mit den Polen einer Influenzmaschine verbunden und ein Entladungsstrom von 400—600 Volt Elektrodenspannung durch die Röhre geschickt. Je nachdem nun die Selenschicht Anode oder Kathode war, wollen wir im folgenden von positiver oder negativer Elektrisierung des Selens sprechen. Nach der Elektrisierung wurde das Präparat aus der Röhre genommen und auf seine lichtelektrische Zerstreuung untersucht.

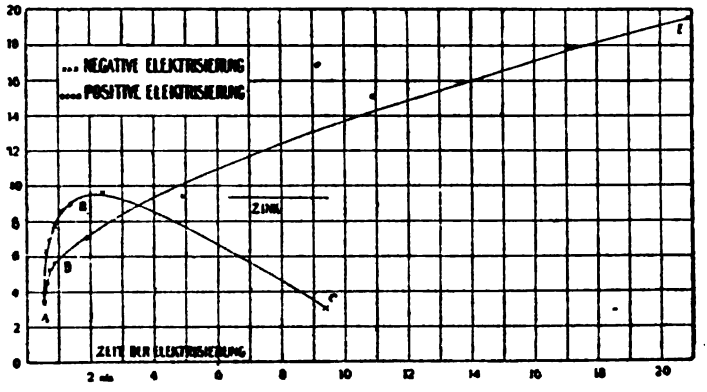


Fig. 151.

Die Kurve ADE in Fig. 151 veranschaulicht das Verhalten einer Selenschicht bei positiver Elektrisierung, die Kurve ABC dasjenige bei negativer Elektrisierung. Auf der Abszissenachse ist die Zeitdauer der vorausgegangenen Elektrisierung in Minuten, auf der Ordinatenachse die Größe des lichtelektrischen Efektes aufgetragen. Man sieht, daß die lichtelektrische Empfindlichkeit bei einer negativen Elektrisierung von 2 Minuten ein Maximum aufweist, um dann wieder abzufallen. Wurde die Selenschicht aber positiv elektrisiert, so wuchs der lichtelektrische Effekt beständig mit Zunahme der Elektrisierungsdauer an. Selbst nach 20 Minuten langer Behandlung weist die Kurve noch kein Maximum auf; die lichtelektrische Empfindlichkeit war in diesem Falle ungefähr doppelt so groß als die des frisch geschmirgelten Zinks. Wurde die

Elektrisierung nicht im Vakuum, sondern in der Atmosphäre vorgenommen, so steigerte positive Elektrisierung die Empfindlichkeit, während negative stets Ermüdung verursachte.

b) Versuche mit amorphem Selen:

Das amorphe Selen zeigt, obwohl es ein Isolator ist, doppelt so große lichtelektrische Zerstreuung als das kristallinische, das doch metallische Leitfähigkeit besitzt. Ferner nimmt bei andauernder Bestrahlung die lichtelektrische Empfindlichkeit des amorphen Selens rasch ab, während das kristallinische keine Ermüdung zeigt; im Dunkeln erholt sich das Präparat wieder. Nach einer positiven Elektrisierung von 6 Minuten stieg die Empfindlichkeit von 4,36 auf 78,4, also auf mehr als den achtfachen Betrag der Empfindlichkeit des geschmirgelten Zinks. Diese hohe lichtelektrische Empfindlichkeit blieb jedoch nicht lange erhalten; sie betrug nach 2 Tagen nur mehr 9,09 und fiel bei längerer Belichtung noch weiter ab; als dann das Präparat eine Minute lang negativ elektrisiert wurde, verlor es seine Empfindlichkeit ganz. Durch positive Elektrisierung wuchs die lichtelektrische Empfindlichkeit wieder auf 51,6 an. Die einzelnen Selenpräparate zeigten, selbst wenn sie in gleicher Weise hergestellt worden waren, quantitativ stark abweichende Resultate.

XVII. Die Ursache der Lichtempfindlichkeit des Selens.

Zur Erklärung der eigenartigen Vorgänge im belichteten Selen wurden die verschiedensten Theorien aufgestellt. Einige von diesen konnten nicht lange standhalten, da sie den experimentellen Forschungsresultaten widersprachen. So nahm Moser (64) an, daß durch die Absorption des Lichtes eine Temperaturerhöhung und infolge der Ausdehnung des Selens eine Verbesserung seines sehr unvollkommenen Kontaktes mit den Elektroden eintrete, was eine Widerstandsabnahme zur Folge habe. Nun können aber Licht und Wärme im Selen gerade entgegengesetzte Wirkungen hervorrufen. Bei Selenpräparaten mit negativem Temperaturkoeffizienten des Widerstandes verursacht Belichtung und Erwärmung eine Widerstandsabnahme; dagegen zeigt eine Selenzelle mit positivem Temperaturkoeffizienten bei Belichtung eine Abnahme, bei Erwärmung eine Zunahme des Widerstandes. Gegenwärtig ist man wohl fast allgemein der Anschauung, daß die Vorgänge im belichteten Selen elektronischer Natur sind; gleichwohl sollen hier alle Theorien, soweit dieselben Anhänger

gefunden und heute noch Interesse bieten, kurz erörtert werden.

a) Die Ursache der Widerstandsabnahme des Selens bei Belichtung.

Da sich die Selenpräparate je nach ihrer Herstellung recht verschiedenartig gegen das Licht verhalten, bietet die Aufstellung einer allgemein gültigen Theorie große Schwierigkeiten. So steigt die Leitfähigkeit während der Bestrahlung bei der einen Art von Selenpräparaten beständig bis zu einem Maximum an, während sie bei der anderen Art das Maximum momentan erreicht, um dann gegen ein Minimum abzufallen. Die meisten Theorien kranken daran, daß sie gerade diese Selenfehler, die Trägheit und Ermüdung, nicht aufzuklären vermögen.

1. Annahme: Die Widerstandsabnahme beruht auf einer chemischen Veränderung des Selens unter dem Einflusse des Lichtes.

Diese Erklärung wurde zuerst von Bidwell (84, 123) gegeben. Er fand, daß möglichst reines, trockenes Selen hohen Widerstand hatte und daß Metallbeimengungen nicht bloß die Leitfähigkeit, sondern auch die Lichtempfindlichkeit bedeutend steigern. Daher kam er zu dem Schlusse, daß die Ursache der Leitfähigkeit und Lichtempfindlichkeit in den Metallzusätzen zu suchen sei und daß reines Selen praktisch als Nichtleiter angesehen werden dürfe. Die Widerstandsabnahme beruht nach Bidwell darauf, daß das Licht die Selenidbildung begünstigt, so daß durch Kettenbildung leitende Adern entstehen. Lichtempfindliche Selenzellen kann man daher nach seiner Meinung nur mit Elektroden erhalten, welche Selenide zu bilden imstande sind. Diese Theorie wird durch Versuche von Uljanin (98), Berndt (201, 202), Pfund (215), Marc (282), Sperling (292) vollständig widerlegt. Berndt und Pfund stellten Selenzellen aus reinem Material unter Anwendung von Kohlenelektroden her. Die Präparate zeigten entgegen der Bidwellschen Annahme erhebliche Lichtempfindlichkeit. Die Widerstandsabnahme bei Belichtung kann also nicht auf chemische Prozesse zurückgeführt werden. Auch gelang es Berndt mittels eines Thermoelements nachzuweisen, daß bei Belichtung in der Zelle keine meßbare Wärmeumsetzung stattfindet, wie sie doch jeden dort auftretenden chemischen Prozeß begleiten müßte. Pfund hat dem sorgfältig gereinigten Selen verschiedene Selenide in gleichem Mischungsverhältnis beigemengt und die Empfindlichkeit in verschiedenen Teilen des Spektrums untersucht. Er fand, daß das Maximum der Empfindlichkeit bei einer Wellenlänge von 700 μ liegt und un-

abhängig vom Metall im Selenid ist, somit vermutlich eine spezifische Eigenschaft des Selens selbst sein muß. Er stellt weiter fest, daß eine Selenzelle nach dem Belichten im allgemeinen denselben Gang in der Widerstandsänderung zeigt, gleichgültig ob sie während der Belichtung vom Strom durchflossen wurde oder nicht; auch dies widerspricht der Theorie Bidwells. Nach Uljanin, Marc und Sperling setzen Metallbeimengungen sogar die Lichtempfindlichkeit herab. Auch nach den Versuchen von Pochettino, der deutliche Lichtempfindlichkeit bei —185° erhielt, erscheint die Bidwellsche Annahme unwahrscheinlich, da eine chemische Reaktion bei der tiefen Temperatur nur schwer vor sich gehen kann.

2. Annahme: Die Widerstandsänderung bei Belichtung beruht auf einer Verschiebung des Gleichgewichtes zwischen 2 verschiedenen Modifikationen des Selens.

Diese Annahme wurde zuerst von Siemens (26) gemacht; er erklärt das graukristallinische Selen als feste Lösung von metallischem Selen Se_2 in nichtmetallischem Se_1. Das Selen nimmt bei längerem Erhitzen auf 200° einen allotropen Zustand an, der nur bei dieser Temperatur stabil ist und bei niedrigeren Temperaturen nur dadurch vor gänzlicher Zerstörung und Umbildung in unmetallisches Selen geschützt wird, daß es in diesem gelöst oder mit ihm verbunden ist. Die Lichtstrahlen führen die kristallinische Modifikation I in die metallisch besser leitende Modifikation II über und machen die latente Wärme der ersteren frei. Bei Verdunkelung bildet sich Modifikation II unter Aufnahme latenter Wärme wieder in Modifikation I zurück. Sperling bemerkt dazu: Für die Siemenssche Annahme lassen sich durch allgemeine physikalisch-chemische Betrachtungen einige Stützen gewinnen. Das Selen gehört der O-S-Gruppe des periodischen Systems an. In der Umgebung des Selens im periodischen System ist Bildung von metallischen aus nichtmetallischen Modifikationen, sowie Begünstigung der metallischen Modifikation durch Licht fast als Regel zu konstatieren. Es wäre merkwürdig, wenn die lichtempflindlichen Eigenschaften des Selens andere Ursachen haben sollten. Vielleicht mag auch folgender von Biltz (205) beobachtete Vorgang hier als Stütze herangezogen werden. Er bewegt ein seidenes Gewebe eine Zeitlang in einer Lösung von Selen. Fast das gesamte aus der Lösung ausfallende Selen wandert an die Faser, und der Stoff erscheint nach dem Auswaschen rotgelb, d. h. mit der Farbe der atomreichen — in Schwefelkohlenstoff löslichen — Selenmodifikation gefärbt. Da die Farbe weder lichtecht noch plättecht ist, also durch Belichtung und

Erwärmung in grau, die Farbe der atomarmen Modifikation, übergeht, so hat sich offenbar das Selen in der atomreicheren Modifikation an der Faser niedergeschlagen. In der Dunkelheit stellt sich nach längerer Zeit die ursprüngliche rote Farbe wieder her.

Nach Berndt (201, 202) existiert das kristallinische Selen in zwei Modifikationen, welche im dynamischen Gleichgewicht miteinander stehen. Durch Belichtung wird dieses verschoben, bei Belichtung kehrt der ursprüngliche Zustand allmählich wieder zurück. Marc (282) unterscheidet zwei Selenformen, Se_A und Se_B. Erstere entsteht durch Erhitzen des amorphen Selens auf niedrige Temperaturen, etwa 130° und ist praktisch ein Nichtleiter der Elektrizität. Durch längeres Erhitzen des Selens auf etwa 200° bildet sich die Modifikation Se_B, welche die Elektrizität leitet und lichtelektrisch empfindlich ist. Die Form, welche bei 200° erhalten wird, ist jedoch zweifellos nicht einheitlich, sondern eine feste Lösung zweier im verschiebbaren Gleichgewicht sich befindenden Formen. Im Lichte wird das Gleichgewicht $Se_A \rightleftarrows Se_B$ zugunsten der letzteren verschoben, also in derselben Richtung wie durch kräftige Erhitzung. Zu ähnlichen Schlüssen kamen auch Sperling (292), Pochettino (338) und Glatzel (394). Gegen diese Auffassung, nach der das Licht eine chemische Umwandlung hervorruft, sprechen die bereits bei der Bidwellschen Theorie angeführten Hinweise. Auffallen muß auch die rasche Rückverwandlung von Se_B in Se_A mit der Abdunkelung. Gegen diese Theorie spricht vor allem auch eine Beobachtung, auf die Korn (378) aufmerksam macht. Belichtet man eine Selenzelle, die reich an Selen von der Modifikation A ist, intensiv, so tritt nicht die geringste Farbenänderung des Selens ein, obwohl nach der Theorie eine Umwandlung in die Modifikation B eingetreten ist. Erhöht man dagegen die Temperatur der Zelle soweit, daß ihr Dunkelwiderstand auf den hundertsten Teil heruntergeht, so läßt sich eine deutliche Änderung der Farbe entsprechend der Umwandlung von Modifikation A in B feststellen. Eine derartige Farbenänderung müßte doch unbedingt auch bei Belichtung auftreten, wenn das Licht wie die Erwärmung die Umwandlung von Modifikation A in B bewirken soll.

Während nach Marc sowohl bei kräftiger Erhitzung wie bei Belichtung die nämliche Selenmodifikation entsteht, fand Kruyt (335), daß beim Erhitzen eine Selenform Se_B von größerem, beim Belichten dagegen eine solche Se_A von kleinerem spezifischen Gewichte sich bildet. Es findet also im Lichte eine Verschiebung des Gleichgewichtes in der Richtung $Se_B \rightarrow Se_A$ statt. Kruyt schließt aus seinen Versuchen auf eine Volumenvergrößerung des Selens im Lichte und bringt damit die elektrische Leitfähigkeitszunahme bei

Bestrahlung in enge Beziehung. Ich (383) habe das Kruytsche Resultat einer gründlichen Prüfung unterworfen und gefunden, daß eine Volumenvergrößerung des Selens bei Belichtung nicht existiert und daß die von ihm beobachteten Schwankungen einer Fehlerquelle entstammen. Damit ist der Kruytschen Theorie aber die Grundlage entzogen.

Kruyt setzte feingepulvertem Selen 0,5 Proz. Silber zu, erhitzte das Präparat im evakuierten Glasrohr drei Tage lang auf 200° und kühlte es langsam ab. Das Selenpulver wurde dann in ein Dilatometer mit flachem Gefäß gebracht, das 4,6 cm lang, 3 cm breit und 0,7 cm tief war. Als Füllflüssigkeit benutzte er Alkohol. An das Dilatometer wurde eine Kapillare von 0,3 mm Lumen, welche mit einer Milchglasskala verbunden war, angeschmolzen und 30 Minuten evakuiert, bis sich der Alkohol auf einen bestimmten Punkt der Skala einstellte. Als Lichtquelle diente eine elektrische Kohlenspitzen-Bogenlampe, deren Licht mittels einer Linse konzentriert wurde. Zur Absorption der Wärmestrahlen war zwischen Lichtquelle und Dilatometer, das sich in einem Wasserbad befand, ein Gefäß mit Alaunlösung eingeschaltet. Bei Belichtung zeigte sich eine Steigung des Flüssigkeitsniveaus von 13—15 mm im Kapillarrohr. Versuche mit einem zweiten Dilatometer von denselben Dimensionen, das mit Eisenpulver und Alkohol gefüllt war, ergaben ein Steigen von 6—7 mm, eine Wirkung, die den Wärmestrahlen zukommt. Die Differenz beträgt also etwa 8 mm. Kruyt schreibt nun das Steigen der Flüssigkeit um 8 mm in der Kapillare des Selendilatometers dem Einflusse des Lichtes zu, zumal er im diffusen Tageslicht, das im März von einer weißen Schneeschicht reflektiert wurde, schon beim Aufziehen bezw. Herablassen des Fenstervorhanges eine Änderung des Flüssigkeitsniveaus in der Kapillare um 7—8 mm erhielt, während das Eisendilatometer dem Tageslicht gegenüber unempfindlich gewesen sein soll.

Ich (383) halte diesen Schluß absolut nicht für berechtigt. Nachgewiesen ist vielmehr, daß bei dem Vorgang tatsächlich Wärmewirkungen beteiligt sind. Nun ist aber nach Fizeau der lineare Ausdehnungskoeffizient des kristallinischen Selens 0,0000493, also mehr als viermal so groß wie der des Eisens. Daher wird eine durch Wärmezufuhr hervorgerufene und am Eisendilatometer noch kaum wahrnehmbare Volumenvergrößerung am Selendilatometer recht deutlich merkbar sein. Ferner ist das Absorptionsvermögen für Wärmestrahlen bei dem Selen stärker als bei dem Eisen. Dazu kommt, daß die spezifische Wärme des Selens ($c = 0{,}08$) geringer ist als die des Eisens ($c = 0{,}11$), und da auch das spezifische Gewicht des Selens nur 4,8 gegen 7,8 bei Eisen beträgt, so reicht zu gleicher Temperaturerhöhung ein und derselben Raumteile

bei dem Selen eine weit geringere Wärmezufuhr hin als bei dem Eisen. Auf Grund dieser Eigenschaften des Selens ist es ganz natürlich, daß das Selendilatometer ein größeres Steigen aufwies als das Eisendilatometer.

Da ein Steigen des Niveaus in der Kapillare bei der Kruytschen Versuchsanordnung sowohl durch Ausdehnung des Selens wie des Alkohols hervorgerufen sein kann, bediente ich mich zur Prüfung des Kruytschen Resultates der hydrostatischen Methode, bei der die Strahlung auf den Alkohol und das Selen in entgegengesetztem Sinne wirkt. Ich brachte eine Selenscheibe von 0,78 mm Dicke und 648 qcm Gesamtoberfläche in einen mit Alkohol gefüllten Glastrog von entsprechenden Dimensionen und bestimmte mittels der hydrostatischen Wage, welchen Auftrieb die Selenscheibe infolge Ausdehnung des Selens durch die Lichtstrahlen erlitt. Als Lichtquelle benutzte ich zu beiden Seiten der Scheibe je eine kräftige Gasglühlichtlampe nebst Spiegel, bei späteren Versuchen Tageslicht. Zwischen Lichtquelle und Glastrog befand sich zur Absorption der Wärmestrahlen eine Alaunlösung. Die Wagschale wurde so belastet, daß der Zeiger der Wage auf Null einspielte. Nun wurde so lange gewartet bezw. reguliert, bis die Zeigerstellung längere Zeit hindurch völlig konstant blieb. Wurde nun belichtet, so trat im ersten Moment keine Änderung der Zeigerstellung ein, nach fünf Sekunden kaum eine Spur und dann erfolgte ein fast gleichmäßiges Anwachsen des Ausschlages innerhalb einer Minute. Nach der Abdunkelung bewegte sich der Zeiger in ungefähr derselben Weise ziemlich gleichmäßig gegen die Null-Lage zurück. Die Selenscheibe hatte tatsächlich eine Gewichtsabnahme bei Bestrahlung erfahren. Eine geringe Erwärmung des Alkohols trat nur ein, wenn die Belichtung mit Gasglühlicht länger als $^3/_4$ bis 1 Minute ausgedehnt wurde, was daraus zu ersehen war, daß der Zeiger, nachdem eine Minute lang abgedunkelt worden war, nicht auf den Nullpunkt zurückging, sondern über den Nullpunkt hinaus nach der Gegenseite ausschlug. Daher wurden nur kurz dauernde Belichtungen vorgenommen, nach denen der Zeiger der Wage wieder konstant auf Null sich einstellte.

Aus dem zeitlichen Verlauf der Erscheinung ergab sich mit Sicherheit, daß die Gewichtsabnahme bei Bestrahlung nicht den Lichtstrahlen, sondern lediglich der Wärmestrahlung zuzuschreiben ist. Ließe sich die durch das Licht hervorgerufene Leitfähigkeitsänderung im Selen durch eine Volumenvergrößerung erklären, wie es Kruyt tut, so müßte die Volumenzunahme den gleichen Verlauf nehmen wie die Leitfähigkeitssteigerung. Nun findet aber beim Auffallen der Lichtstrahlen eine momentane starke Leitfähigkeitssteigerung und im weiteren Verlauf der Belichtung nur noch eine

schwache Änderung der Leitfähigkeit statt. Die Volumenvergrößerung, gemessen mittels der hydrostatischen Wage, gab ein ganz anderes Bild. Von einem momentanen Anwachsen ist überhaupt gar keine Rede und die allmähliche Volumenzunahme weist auf Wärmewirkung hin. Den gleichen Verlauf nahm die Erscheinung bei Belichtung der Selenplatte mit Tageslicht.

Um den Unterschied zwischen Leitfähigkeits- und Volumensteigerung bei Bestrahlung an ein und demselben Präparat studieren zu können, baute ich in eine Selenplatte von der beschriebenen Art mehrere Selenzellen ein und bestimmte die Leitfähigkeits- und Volumenzunahme für die gleiche Be-Belichtung. Der zeitliche Verlauf der Leitfähigkeitsänderung während der Bestrahlung und kurz nach derselben ist in Kurve I der Fig. 152 dargestellt. Kurve II gibt den zeitlichen Verlauf der Volumenänderung infolge der Bestrahlung an.

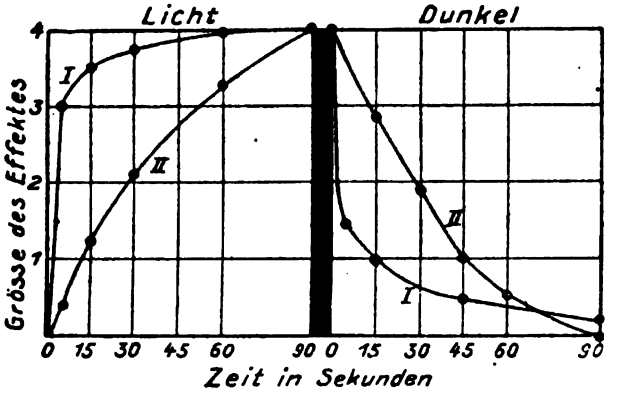


Fig. 152.

Die beiden Kurven haben gar keine Ähnlichkeit; man sieht, daß Leitfähigkeits- und Volumenänderung bei Bestrahlung nicht parallel gehen; es existiert demnach auch nicht der von Kruyt angenommene Zusammenhang zwischen beiden Erscheinungen. Die Volumensteigerung erklärt sich vielmehr lediglich durch Wärmeabsorption, wie sich aus dem zeitlichen Verlauf der Erscheinung zweifellos ergibt. Übrigens wurde auch bei Ersatz der Selenscheibe durch eine Aluminiumscheibe der Effekt beobachtet, was sicherlich nur durch Wärmeabsorption erklärt werden kann.

Brown (368—370) nimmt an, daß das Selen aus drei Modifikationen A, B, C besteht, wobei A nicht leitend ist, B metallisch leitet und C eine im Vergleich zu B zu vernachlässigende Leitung besitzt. Bei Belichtung verwandelt sich

A in B und B in C. Brown ist übrigens in letzter Zeit zu der elektronischen Auffassung der Vorgänge im Selen übergegangen.

3. Annahme: Die Widerstandsabnahme des Selens beruht auf einer Widerstandsverminderung des absorbierten Wassers unter dem Einflusse des Lichtes.

Diese Anschauung wurde nur von Weigel (235) vertreten. Die Selenzelle muß nach Weigel unbedingt eine bestimmte Wassermenge enthalten, um überhaupt lichtelektrisch empfindlich zu sein. Um diese Anschauung zu stützen, bringt Weigel nur einen einzigen direkten Beweis, indem er festzustellen sucht, daß die Lichtempfindlichkeit verschwindet, wenn dem Selen das Wasser entzogen wird. Ein Präparat, das in ein Gefäß mit Phosphorpentoxyd gebracht wurde, besaß anfänglich gute Lichtempfindlichkeit, die allmählich abnahm; schließlich wurde das Präparat anomal, es trat bei Belichtung bisweilen Widerstandszunahme auf.

Ich (383) habe die Weigelschen Versuche wiederholt, bin aber zu einem ganz anderen Resultat gelangt. Ich habe stets ohne Ausnahme, wenn ich ganz trockene Präparate der Feuchtigkeit aussetzte, eine allmähliche Abnahme der Lichtempfindlichkeit bis zu Null und negativen Werten konstatieren können. Ferner wurde eine feuchte anomale Zelle eine Stunde lang durch einen trockenen Luftstrom getrocknet und dann in ein Glasgefäß eingeschlossen, das langsam auf 50 mm evakuiert wurde. Dabei trat die Lichtempfindlichkeit des Präparates immer mehr hervor und schließlich wurde die Zelle ganz normal. Als die Zelle hierauf ins Freie gebracht wurde, sank ihre Lichtempfindlichkeit immer mehr und schließlich wurde die Zelle bei der eben herrschenden großen Feuchtigkeit wieder anomal. Ferner schloß ich eine Selenzelle in ein Glasgefäß, das Phosphorpentoxyd enthielt, luftdicht ein und prüfte sie mehrere Tage hintereinander bei gleicher Temperatur. Es zeigte sich eine beständige Abnahme der Dunkelleitfähigkeit zugleich mit dem Wassergehalt des Präparates, während die Lichtempfindlichkeit allmählich anstieg. Ich komme also zu dem gerade entgegengesetzten Resultat als Weigel: Entzieht man dem Selen Feuchtigkeit, so steigt die Lichtempfindlichkeit.

Übrigens gibt Weigel selbst Beobachtungen an, die direkt das Gegenteil von dem beweisen, was er behauptet. Er brachte eine Zelle in destilliertes Wasser und belichtete sie wiederholt. Bei jeder folgenden Belichtung sank die Lichtempfindlichkeit immer mehr. Als die Zelle aus dem Wasser gebracht und getrocknet wurde, hatte sie wieder höhere Lichtempfindlichkeit, die aber beim Eintauchen der Zelle ins

Wasser rasch sank, besonders beim Schütteln. Andere Reagenzien hatten noch einen größeren Einfluß und bewirkten Widerstandsvermehrung. Dieser Versuch ist doch ein deutlicher Beweis für den schädlichen Einfluß des Wassers. Auch die Beobachtung Weigels, daß die Lichtempfindlichkeit im Vakuum größer ist als bei Atmosphärendruck, ist unvereinbar mit seiner eigenen Auffassung von dem Wesen der Lichtempfindlichkeit des Selens.

Gegen die Weigelsche Annahme, daß die Lichtempfindlichkeit des Selens auf einer Widerstandsverminderung des absorbierten Wassers beruhe, spricht vor allem noch die Tatsache, daß das Wasser überhaupt keine Widerstandsverminderung bei Bestrahlung zeigt.[1]) Man könnte sich aber denken, daß der Becquereleffekt[2]) in den feuchten Zellen bei Belichtung auftritt. Belichtet man nämlich von zwei in einen Elektrolyten tauchenden oxydierten Elektroden die eine, so tritt eine Änderung des schon im Dunkeln existierenden Stromes auf. Diese Erscheinung heißen wir nach dem Erfinder Becquerelleffekt. Dieser kann aber ebenfalls nicht die Ursache der Lichtempfindlichkeit des Selens sein, da der Becquereleffekt je nach der Natur der Elektrode, dem Potential und der Wellenlänge des Lichtes sich in ganz verschiedenem Sinne äußern kann.

Die weitere Weigelsche Annahme, daß durch die Belichtung das Selen oberflächlich in den Poren zu Selensäure oxydiert werde, die sich in Wasser schnell löse und ihm eine bessere Leitfähigkeit erteile, steht im Widerspruch mit der Tatsache, daß die Lichtempfindlichkeit mit steigender Temperatur abnimmt, während doch durch Temperaturerhöhung die Oxydation begünstigt werden sollte. Weigel nimmt deshalb weiter an, daß die Oxydation des Selens im Lichte auf Bildung von Wasserstoffsuperoxyd beruhe; so sei es verständlich, daß mit steigender Temperatur die Lichtempfindlichkeit sinke, da auch die Menge des gebildeten Wasserstoffsuperoxyds bei Temperaturerhöhung etwa proportional der Temperatur abnehme. Es genügt wohl, daran zu erinnern, daß Wasserstoffsuperoxyd auf das Selen eine beträchtlich geringere Wirkung ausübt als das Licht, und daß der zeitliche Verlauf der Leitfähigkeitsänderung ein wesentlich anderer ist.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, daß sich die Lichtempfindlichkeit einer normalen Selenzelle nicht wesentlich ändert, wenn man die Zelle langsam unter den Gefrierpunkt des Wassers abkühlt. Ja nach Pochettino (170) besitzt das Selen selbst bei — 185° noch recht gute Lichtempfindlichkeit.

---

[1]) Vergl. Ries „Das Licht" Ambr. Barth, Leipzig 1909, S. 231—237.

[2]) Vergl. Ries ebenda, S. 170—207.

Die Weigelsche Theorie hat keine Anhänger gefunden. Man hat sich vielmehr davon überzeugt, daß die Feuchtigkeit einen sehr schädlichen Einfluß auf die Selenzelle ausübt. Daher überzieht man allgemein die Selenzellen mit einem schützenden Überzug oder schließt sie in evakuierte Röhren ein.

4. Annahme: Alle Seleneffekte beruhen auf Polarisationserscheinungen.

Reichinstein (504) ist der Anschauung, daß die Selenzelle im stromlosen Zustande einen weit geringeren Widerstand hat als im stromdurchflossenen. Wird an eine Selenzelle eine Spannung V angelegt, so bildet sich fast momentan eine Polarisationsspannung V'. Da infolgedessen nur mehr die Spannung V—V' wirksam ist, so wächst der Widerstand scheinbar beim Anlegen einer Spannung. Ist V' sehr groß, so kann der scheinbare Widerstand außerordentlich viel höher sein als der wahre d. h. der im stromlosen Zustand vorhandene. Fällt nun Licht auf eine Selenzelle, so wird die Polarisationsspannung herabgesetzt, der Strom steigt und der Widerstand der Zelle nimmt scheinbar ab.

Greinacher (501) zeigt, daß die von Reichinstein mit rotierendem Unterbrecher gemessenen Spannungen sich zusammensetzen aus wirklichen Polarisationsspannungen und aus Kapazitätswirkungen infolge der Kondensatorform der Selenzelle und daß der Einfluß des Lichtes auf diese scheinbaren Polarisationsspannungen sich ungezwungen durch die Verminderung des Selenwiderstandes erklärt. Nach der Reichinsteinschen Annahme müßte der Selenwiderstand bei der bekanntlich starken Lichtwirkung im stromlosen Zustand sehr viel kleiner sein als im stromdurchflossenen; der Widerstand müßte also bei Stromschluß von einem relativ geringen Anfangswert zu einem relativ großen Endwert anwachsen. Ferner müßte eine belichtete Zelle im stromlosen Zustand denselben Widerstand zeigen wie eine unbelichtete, nach Stromschluß aber würde sich infolge der Lichtwirkung eine geringere Polarisationsspannung ausbilden. Demgemäß müßte der Anfangswert des Widerstandes bei Licht und Dunkel derselbe sein, der Widerstand des belichteten Selens würde aber zu einem viel kleineren Endwert anwachsen. Greinacher zeigt dagegen, daß der Stromanstieg bei belichteter und unbelichteter Zelle in gleicher Weise erfolgt. Der Einfluß des Lichtes ist nach seinen Untersuchungen auch in den ersten milliontel Sekunden nach Stromschluß, wo die Polarisation sich erst auszubilden beginnt, als Verminderung des eigentlichen Selenwiderstandes aufzufassen.

5. Annahme: Die Widerstandsabnahme des Selens ist eine indirekte Wirkung des Lichtes,

hervorgerufen durch Phosphoreszenz des Selens.

Himstedt (145) sprach die Vermutung aus, daß durch die Lichtstrahlen im Selen eine Fluoreszenz oder Phosphoreszenz hervorgerufen werde und daß das Selen erst sozusagen unter der Wirkung seiner eigenen Strahlen seinen Widerstand ändere. Freilich konnte Himstedt eine Fluoreszenz oder Phosphoreszenz experimentell nicht nachweisen. Trotzdem ist die Annahme nicht ganz unberechtigt, wie aus den Beobachtungen von Hesehus (82) und Merritt (283) hervorgeht. Nach Hesehus haben die Kurven für die Trägheit im Selen mit den Phosphoreszenzkurven auffallende Ähnlichkeit. Merritt fand, daß die Rückkehr der Leitfähigkeit einer bestrahlten Selenzelle zum ursprünglichen Dunkelwert in derselben Weise sich vollzieht wie die Abnahme der Lichtintensität einer phosphoreszierenden Substanz im Dunkeln. Die formale Ähnlichkeit ist eine so große, daß man daran denken könnte, daß beide Prozesse auch im Wesen ähnlich sind. Es sollen hier noch einige Beobachtungen von Davis (208) und Chabot (224) angeführt werden, nach denen das Selen tatsächlich Strahlen aussendet. Die Erscheinung erklärt sich jedoch offenbar durch das Auftreten von Metallstrahlen. Nach Davis vermag ein Stück Selen, welches man auf eine dreifach in Papier eingewickelte photographische Platte legt und 36 Stunden dem Sonnenlicht aussetzt, auf die Platte scharf einzuwirken. Chabot hat gefunden, daß eine Selenzelle im Dunkeln innerhalb 48 Stunden auf eine photographische Platte einzuwirken vermag; beim Durchgang des Stromes steigert sich der Effekt. Schließlich sei hier noch darauf hingewiesen, daß Selendämpfe im überhitzten Zustand fluoreszieren und zwar im wesentlichen blau (S. 19).

6. Annahme: Das Licht bewirkt eine Ionisation des Selens.

Vertreter dieser Anschauung waren insbesondere Hesehus (82, 229) und Schrott (258). Hesehus war der Ansicht, daß die Leitfähigkeit des Selens durch eine partielle Dissoziation der Moleküle, die durch das Licht vergrößert werde, zustande komme. Nach Schrott erhält das Selen im Dunkeln keine freien Ionen; unter der Einwirkung des Lichtes, das mehr oder minder tief in das Selen eindringt, entstehen freie Ionen, welche die vergrößerte Leitfähigkeit bedingen; im Dunkeln verbinden sich dieselben aufs neue. Nach dem heutigen Stand der Elektronentheorie und den neuesten Anschauungen über das Wesen der Leitfähigkeit der Metalle muß wohl die Annahme einer ionisierenden Wirkung des Lichtes der elektronischen Auffassung Platz machen.

7. Annahme: Die Widerstandsabnahme unter dem Einflusse des Lichtes ist ein elektronischer Vorgang.

Der erste, der diesen Gedanken veröffentlichte, war Pfund (336). Nach ihm erregt das Licht, wenn es vom Selen absorbiert wird, Resonanz im Atom; diese Resonanz führt ihrerseits zur Austreibung von Elektronen und erhöht dadurch die Zahl der für den Stromtransport verfügbaren Elektronen. Die von Amaduzzi (345) ausgesprochene Anschauung, daß die Leitfähigkeitsvergrößerung bei Bestrahlung in einer Entladung von Teilchen zu Teilchen bestehe, ist nicht zutreffend. Denn die lichtelektrische Entladung (S. 196), wie sie Amaduzzi annahm, kommt fast ausschließlich den ultravioletten Strahlen zu, während die hauptsächlichste Wirkung auf den Selenwiderstand dem sichtbaren Licht zuzuschreiben ist. Die elektronische Auffassung der Vorgänge im belichteten Selen wurde von mir in einer besonderen Arbeit (383) weiter ausgebaut; sie soll im folgenden ausführlicher angegeben werden, weil man jetzt fast allgemein dieser Annahme zuneigt. Als Grundlage dient die neueste Anschauung über die Leitfähigkeit der Metalle, wonach der Durchgang eines Stromes durch einen Leiter in einer Bewegung von Elektronen besteht. Aus der experimentell nachgewiesenen Erscheinung, daß unter dem Einflusse ultravioletter Strahlen die Elektronen in einem Metall derart zum Mitschwingen angeregt werden, daß sie aus dem Körper herausfliegen (äußerer lichtelektrischer Effekt), wird durch Analogieschluß folgende Annahme hergeleitet: Unter dem Einflusse der sichtbaren Lichtstrahlen, deren Schwingungen viel langsamer als die des ultravioletten Lichtes erfolgen, werden ebenfalls Elektronen zum Mitschwingen angeregt; da aber deren Anfangsgeschwindigkeit zu klein ist als daß sie den Körper verlassen könnten, werden sie in diesem selbst in fortschreitende Bewegung versetzt (innerer lichtelektrischer Effekt). Darnach hat man sich die Vorgänge im belichteten Selen folgendermaßen vorzustellen.

Die Wirkung des Lichtes auf die Leitfähigkeit des Selens ist ein Resonanzphänomen. Durch Licht bestimmter Periode werden diejenigen Elektronen des Selen, deren Eigenperiode mit der Periode des erregenden Lichtes übereinstimmt, zum Mitschwingen angeregt und in fortschreitende Bewegung versetzt. Die Resonanzbewegungen bei der Absorption des Lichtes spielen nur eine auslösende Rolle für Bewegungen, die schon innerhalb der Körperatome vorhanden sind. Die Leitfähigkeitsänderungen im Selen werden durch die sichtbaren (blauen, violetten) Lichtstrahlen hervorgerufen, deren Schwingungen bekanntlich viel langsamer erfolgen als die des ultravioletten Lichtes. Daher besitzen auch die vom

sichtbaren Licht im Selen ausgelösten Elektronen eine viel geringere Anfangsgeschwindigkeit, so daß sie den Körper nicht verlassen können und sich nur an der bestrahlten Seleoberfläche anhäufen. Nun findet aber nach den neuesten Anschauungen über die Leitfähigkeit der Metalle bei dem Stromdurchgang eine Bewegung von Elektronen durch den Leiter statt. Demnach erhöht sich unter dem Einflusse des Lichtes die Zahl der für den Stromtransport verfügbaren Elektronen und somit die Leitfähigkeit der bestrahlten Oberfläche. Daß auf das Selen ein größerer Bereich des Spektrums sich wirksam zeigt, hat seine Ursache darin, daß jede Zelle aus verschiedenartigem Selen besteht.

Wie erklärt sich nun der Unterschied in dem Verhalten der sogenannten harten und weichen Zellen während der Bestrahlung? Bei den harten Zellen steigt die Leitfähigkeit während der Bestrahlung bekanntlich allmählich bis zu einem Maximum an (Trägheit), während bei den weichen Zellen die Leitfähigkeit ihr Maximum fast momentan mit dem Auffallen der Lichtstrahlen erreicht, um dann langsam gegen ein Minimum abzunehmen (Ermüdung). Der Unterschied erklärt sich aus dem verschiedenartigen Kristallisationsverfahren bei den beiden Zellenarten. Das weiche Selen wird durch langdauerndes Erhitzen des festen oder auch flüssigen Selens auf einer Temperatur, die dem Schmelzpunkte nahe liegt, gewonnen, während hartes Selen bei niedrigeren Temperaturen sich bildet. Nun wissen wir aber aus den neuesten Versuchen von Brown (459), daß die lichtempfindlichen Selenkristalle bei der Destillation des amorphen Selens an der Oberfläche sich ansetzen und daß die Kristalle nur bei Erhitzungstemperaturen, die dem Schmelzpunkt sehr nahe liegen, sich ausbilden können. Wir dürfen daher annehmen, daß sich bei den weichen Zellen an der Oberfläche eine dünne Schicht von verhältnismäßig hoher Leitfähigkeit und Empfindlichkeit ausbildet, während die darunter liegenden Schichten nur mäßige Lichtempfindlichkeit aufweisen (Fig. 153a).

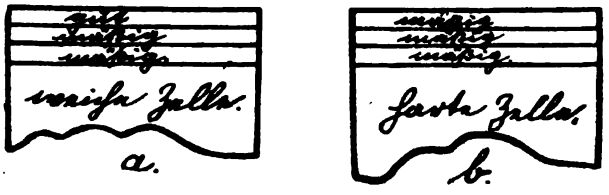


Fig. 153.

Die harten Zellen dagegen, die bei niedrigeren Temperaturen entstehen, besitzen fast durchweg gleichartige Kristallisation

(Fig. 153b). Die Vorgänge während der Bestrahlung vollziehen sich dann in folgender Weise.

Bei einer harten Zelle werden mit dem Eindringen des Lichtes in das Selen allmählich auch aus tieferen Schichten Elektronen ausgelöst, so daß die Stromstärke während der Bestrahlung ansteigt. Da aber die in das Innere eindringende Lichtmenge gering ist im Verhältnis zu der auf die Oberfläche treffenden Lichtenergie, so kann infolge der Tiefenwirkung allein noch keine so bedeutende Leitfähigkeitszunahme im Verlaufe der Belichtung auftreten. Eine besondere Rolle spielt hier die Tatsache, daß der spezifische Widerstand metallischer Schichten bis zu einer Schichtdicke von der Größenordnung 10^{-5} mm konstant bleibt, mit abnehmender Schichtdicke dagegen sehr rasch anwächst. Fällt nun Licht auf eine Selenzelle, so muß die Dicke der Oberflächenschicht, die bei Bestrahlung eine erhöhte Leitfähigkeit erhält, mit dem Eindringen des Lichtes erst rasch, dann langsam zunehmen und sich so der kritischen Schichtdicke immer mehr nähern, was eine allmähliche Widerstandsabnahme der stromführenden Schicht zur Folge hat. Die Tiefenwirkung äußert sich also in zweifacher Weise, es erfolgt eine Leitfähigkeitszunahme teils infolge einer direkten Beeinflußung der tieferen Schichten, teils infolge Anwachsen der stromführenden Oberflächenschicht bis zur kritischen Schichtdicke. Sobald das Licht bis zur kritischen Schichtdicke eingedrungen ist, fällt die Leitfähigkeitszunahme der 2. Art weg und nun wird die Leitfähigkeit verhältnismäßig wenig wachsen. Die Richtigkeit dieser Anschauung wird durch die Tatsache gestützt, daß die Annäherung an ein Maximum durch Anwendung großer Lichtstärken viel rascher erreicht wird als bei schwacher Belichtung.

Die Teilnahme der tiefer liegenden Selenschichten an den lichtelektrischen Vorgängen ergibt sich zweifellos aus den Versuchen von Gyulai (S. 198) über die lichtelektrische Zerstreuung am kristallinischen Selen. Darnach unterscheidet sich das kristallinische Selen bezüglich der Ermüdung ganz bedeutend von den übrigen Körpern, indem die lichtelektrische Entladung des Selens in der Atmosphäre dauernd ansteigt, insbesondere unter dem gleichzeitigen Einflusse des sichtbaren Lichtes, während Metalle große Ermüdung zeigen. Offenbar findet eben bei Belichtung des Selens eine Bewegung von Elektronen aus tieferen Schichten gegen die Oberfläche hin statt, wodurch die lichtelektrische Entladung begünstigt wird.

In einer harten Zelle besitzen die unter einander liegenden Schichten (Fig. 153b) annähernd die gleiche Leitfähigkeit im Dunkeln; bei Belichtung freilich nimmt die Leitfähigkeit der Schichten von der Oberfläche nach dem Inneren des Selens

hin immer mehr ab; immerhin ist die Anteilnahme der tieferen Schichten an der Stromführung noch ziemlich erheblich. Anders verhält es sich mit weichen Zellen, bei denen schon im Dunkeln die dünne Oberflächenschicht wesentlich besser leitet als die anschließenden tieferen Schichten und die Stromführung sich fast nur in der dünnen Oberflächenschicht vollzieht. Bei Bestrahlung erfolgt eine Bewegung der Elektronen gegen die Lichtquelle hin, also ein Hindrängen der Elektronen nach der Oberfläche zu. Diese Bewegung der Elektronen gegen die Oberfläche hin muß in der weichen Zelle, deren Oberflächenschicht eine weit größere Leitfähigkeit besitzt als bei der harten Zelle, sehr stark zum Ausdruck kommen, während sie bei der harten Zelle infolge ihrer mehr gleichmäßigen Leitfähigkeit der einzelnen Schichten weniger in die Erscheinung tritt. So kommt es, daß sich der Elektronentransport bei der weichen Zelle während der Bestrahlung immer mehr gegen die Oberfläche zu verdichtet, was einer Abnahme der Stärke der stromführenden Schicht gleichkommt und zu einer allmählichen Abnahme der Leitfähigkeit führt.

Der Unterschied in dem verschiedenartigen Verhalten der harten und weichen Zellen bei Belichtung liegt also in der Verschiedenheit der äußersten Oberflächenschichten im Vergleich zu den darunter befindlichen Schichten.

Im Anschlusse an diese Betrachtung will ich einige ältere Anschauungen über die Vorgänge bei der Ermüdung anführen. Hesehus (82, 229) sucht die Ursache der Ermüdung in einer durch Lichtabsorption bewirkten Temperaturerhöhung des Selens, welche sich erst nach längerer Zeit bemerkbar machen kann. Da Zellen mit Ermüdung bei Temperaturerhöhung ein wesentlich anderes Verhalten zeigen können als bei Bestrahlung, trifft diese Annahme sicherlich nicht zu. Nach Schrott (258) besteht die Lichtwirkung in einer Ionisation des metallischen Selens, welche bis zur Sättigung fortschreitet; das Anwachsen des Widerstandes nach erfolgter Sättigung ist auf eine gleichzeitige Photopolymerisation zurückzuführen. Siemens (26) ist der Ansicht, daß die Lichtwirkung in einer raschen Neubildung metallischen Selens Se_2 aus dem nichtmetallischen Se_1 besteht. Nun ist aber letzteres in weit höherem Maße durchscheinend als das metallische. Daher kann anfangs das Licht verhältnismäßig weit in das Innere eindringen, nach der Umbildung der äußeren Schichten in metallisches Selen aber wird das Licht vom Innern abgeschnitten und es tritt eine Rückbildung der inneren Schichten in unmetallisches Selen ein, wodurch die Leitfähigkeit der Zelle abnimmt. Sperling (292) erklärt den Vorgang in gleicher Weise als Siemens, nennt ihn aber Schatteneffekt, da bei längerer Belichtungsdauer die inneren

Schichten gewissermaßen in den Schatten der äußeren treten. Meiner Meinung nach ist eine allmähliche Umbildung der Oberflächenschicht während der Bestrahlung ganz ausgeschlossen; denn die Ermüdung ist bei hochempfindlichen Zellen meist ganz beträchtlich und es müßte eine so umfangreiche Umbildung von Se_1 in Se_2 eine Farbenänderung des Selens zur Folge haben, wovon indes keine Spur zu beobachten ist.

Daß die Ermüdung auf Tiefenwirkung beruht, unterliegt keinem Zweifel. Denn man kann sich an einer gravierten Selenzelle mit sehr dünner, durchsichtiger Selenschicht, die das Licht durchdringt, jederzeit davon überzeugen, daß die Leitfähigkeit während der Bestrahlung fast vollständig konstant bleibt. Die Annahme, daß während der Bestrahlung die Oberflächenschicht gegen die tieferen Schichten sich ändert, ist unbegründet. Es scheint vielmehr bei weichen Zellen die dünne Oberflächenschicht schon im Dunkeln eine wesentlich bessere Leitfähigkeit zu besitzen als die anschließenden Schichten. Bei Bestrahlung findet ein beständiges Hinströmen der aus tieferen Schichten ausgelösten Elektronen gegen die Oberflächenschicht statt, so daß der Elektronentransport schließlich fast nur mehr in der äußersten Schicht größter Leitfähigkeit vor sich geht, was praktisch einer allmählichen Verringerung des Leitungsquerschnittes der stromführenden Schicht gleichkommt und sich durch eine Leitfähigkeitsabnahme äußert.

Bei der Abdunkelung vereinigen sich die freien Elektronen wieder mit den positiven Atomen infolge ihrer gegenseitigen Anziehung. Da die Leitfähigkeit des Selens nach der Bestrahlung nicht momentan auf den ursprünglichen Dunkelwert zurückgeht, findet offenbar ein Teil der Elektronen auf seinem Wege durch das Selen erst nach einiger Zeit Anschluß an Atome. Die Zeit, die bis zur vollständigen Wiedervereinigung vergeht, ist um so länger, je länger und intensiver die vorhergehende Bestrahlung war und je mehr Elektronen infolgedessen aus tieferen Schichten ausgelöst worden waren. Wenn es Tatsache ist, daß Se_1 in weit höherem Maße durchscheinend ist als das metallische Se_2, worauf bereits Siemens (26) hingewiesen hat, so müssen die Lichtstrahlen bei gleicher Intensität in eine harte Zelle viel tiefer eindringen als in eine weiche. Daher müßte die vom Licht beeinflußte Schicht bei einer weichen Zelle viel dünner und infolgedessen deren spezifische Leitfähigkeit wesentlich größer sein, so daß die Angliederung der Elektronen an Atome bei Verdunkelung in einer weichen Zelle schneller vor sich gehen könnte als in einer harten. Tatsächlich besitzt erstere geringere Trägheit nach der Bestrahlung als die harte Zelle.

Auch der innige Zusammenhang zwischen Spannungseffekt und Lichtempfindlichkeit (S. 144) führt zu der elektronischen Auffassung der Vorgänge im belichteten Selen. Wenn die Leitfähigkeit des Selens bei Zunahme der Stromstärke wächst, so findet offenbar eine Elektronenauslösung beim Durchgang des stärkeren Stromes statt. Da nun eine Anzahl derjenigen Elektronen, deren Auslösung sonst durch das Licht erfolgt wäre, bereits durch den Strom ausgelöst worden ist, so muß die Lichtempfindlichkeit bei der höheren Stromstärke geringer ausfallen. Geht man wieder zu einer kleineren Stromstärke über, so tritt derselbe Fall ein, den wir sonst beim Übergang von Belichtung zur Abdunkelung beobachten und als Trägheit bezeichnen. Die Leitfähigkeit kehrt nicht sofort auf ihren ursprünglichen Wert zurück. Die ausgelösten Elektronen haben sich zum Teil noch nicht an Atome angegliedert, weshalb die Leitfähigkeit noch erhöht ist, und bei sofort erfolgender Belichtung steht nur eine geringere Anzahl leicht abtrennbarer Elektronen zur Verfügung. Daher beobachtet man auch nach vorübergehender Anlegung einer höheren Spannung einen Empfindlichkeitsverlust. Schließlich sei noch darauf hingewiesen, daß Änderung der Spannung und der Lichtintensität in gleichem Sinne auf die Leitfähigkeit des Selens wirken.

Nun werden uns auch andere Beobachtungen am Selen klar. Es wird allgemein angenommen, daß der Transport der Wärme im Metall fast ganz durch die frei beweglichen Elektronen besorgt wird. Wenn nun das sichtbare Licht auf die Elektronen im Selen einzuwirken vermag, so muß auch die Wärmeleitfähigkeit des Selens bei Bestrahlung sich ändern. Tatsächlich haben Belatti und Lussana (91), sowie Pochettino und Trabacchi (287) gefunden, daß durch Belichtung die Wärmeleitfähigkeit des Selens gesteigert wird. Bei der Thermoelektrizität ferner haben wir es mit elektronischen Vorgängen an der Grenze zweier Metalle zu tun. Dieselben müssen natürlich im Selen durch das Licht beeinflußt werden. Weidert (234) vermochte denn auch eine Abnahme der thermoelektrischen Kraft des Selens im Licht um 3—4% nachzuweisen. Natürlich werden auch elektrische Schwingungen die Elektronenbewegung im Selen beeinflussen können.

Kaempf (397) faßt die Lichtempfindlichkeit und den Spannungseffekt als elektronische Vorgänge auf. Seine Beobachtungen beim Spannungseffekt führten ihn zu der Annahme, daß die Leitfähigkeit des Selens eine doppelte ist. Er weist darauf hin, daß das momentane Ansteigen der Stromstärke bei Steigerung der Spannung sehr an Verhältnisse erinnert, die in Gasen bei der Oberflächenionisation eintreten, wo bekanntlich für kleine Spannungen die Stromstärke pro-

portional mit dem Quadrate der Spannung wächst. Man könnte daher die Stromleitung im Selen als eine Übereinanderlagerung einer Eigenleitfähigkeit des Selens und einer an der Grenzschicht Selen-Metall vorhandenen Leitfähigkeit auffassen.

Brown (454, 458) kommt auf Grund seiner Versuche über den Einfluß des Druckes auf die Leitfähigkeit und Lichtempfindlichkeit der Selenkristalle zu der Anschauung, daß im metallischen Selen die Elektronen in der Kristallstruktur verschieden stabil gebunden sind und daß durch äußere Kräfte die Festigkeit ihrer Bindung beeinflußt werden kann, so daß vorübergehend eine größere Zahl von Elektronen frei wird.

8. Annahme: Die Widerstandsabnahme des belichteten Selens ist ein elektromagnetischer Schwingungseffekt.

Die Entdeckung des Wechselstromeffektes (S. 176) brachte Greinacher (481) zu einer neuen Anschauung über das Wesen der Lichtwirkung im Selen. Nach ihm erinnert der Wechselstromeffekt sehr stark an den gewöhnlichen Lichteffekt. In beiden Fällen sendet man einen Gleichstrom durch die Selenzelle; im ersten Fall läßt man Licht auf die Zelle fallen, wodurch man eine Stromzunahme erhält, im zweiten Falle ersetzt man das Licht durch einen Wechselstrom und bekommt dieselbe stromvergrößende Wirkung. Zwischen Wechselstromeffekt und Lichteffekt besteht demnach ein innerer Zusammenhang, der in der Verwandschaft des Lichtes mit Wechselströmen zu suchen ist. Während dort durch auffallende Wellen elektromagnetische Wechselfelder im Selen hervorgerufen werden, legt man hier solche direkt an die Zelle an. Lichteffekt und Wechselstromeffekt sind elektromagnetische Schwingungseffekte; in dem einen Falle hat man auftreffende (fortschreitende) Wellen, in dem anderen stehende Wellen (Schwingungen). Der wesentliche Unterschied liegt nur in der immensen Verschiedenheit der Frequenzen, die beim Licht $5 \cdot 10^{14}$, bei den Versuchen von Greinacher nur 50—3000 betragen. Greinacher hält daher die Lichtempfindlichkeit des Selens nur für einen Spezialfall einer allgemeineren Eigenschaft, nämlich der Wechselstromempfindlichkeit gewisser Widerstände. Die Leitfähigkeitserhöhung im Selen kommt dadurch zustande, daß im elektromagnetischen Schwingungsfelde Elektronen abgetrennt werden, so daß die Zahl der stromführenden Elektronen wächst.

Durch meine Untersuchungen (S. 179) des Wechselstrom- und Gleichrichtereffektes ist zweifellos erwiesen, daß der von Greinacher vermutete Zusammenhang zwischen Licht- und Wechselstromeffekt nicht besteht, wodurch der eben angeführten Theorie über das Wesen der Lichtwirkung im Selen die Grundlage entzogen ist.

Was die von Agostini (133) und Berndt (302) beobachtete Widerstandsabnahme des Selens unter dem Einflusse elektrischer Schwingungen betrifft, so spricht die Erscheinung in gleicher Weise auch für die elektronische Auffassung der Vorgänge im belichteten Selen.

b) Die Ursache der Erregung einer elektromotorischen Kraft im belichteten Selen.

In einem Selenelement, gleichgültig ob es fest oder elektrolytisch ist, hat der durch das Licht hervorgerufene Strom immer die gleiche Richtung; stets fließt durch das belichtete Element ein photoelektrischer Strom in der Richtung der Lichtstrahlen. Dieser Strom kommt dadurch zustande, daß negative Elektronen aus der bestrahlten Selenschicht gegen die Lichtquelle zu auf die angrenzende Elektrode übergehen. In einer elektrolytischen Zelle ist diese Erscheinung hinreichend unter dem Namen Becquereleffekt (S. 9) bekannt. Der lichtelektrische Strom wird, wie ich gefunden, von den gleichen Strahlen hervorgerufen wie die Leitfähigkeitszunahme. Die Elektronen, die durch Absorption des Lichtes im metallischen Selen in Bewegung gesetzt werden, besitzen also nur geringe Geschwindigkeit, so daß sie den Körper nicht verlassen können. Da aber bei den festen Zellen das Selen direkt auf die durchsichtige Metallschicht aufgeschmolzen ist, so daß Selen und Metall einen Körper bilden, können die von Licht in Bewegung gesetzten Elektronen an die Metallelektrode gelangen und den Elektronenstrom unterhalten; in gleicher Weise gehen in den elektrolytischen Elementen die aus der belichteten Selenelektrode ausgelösten Elektronen auf den Elektrolyten über (S. 211).

Nach Korda (102) ruft das Licht im lichtempfindlichen Selen, das er als ein Gemisch von gut leitender Masse und schlecht leitenden Kristallen erklärt, eine elektrische Spannung hervor, die durch Influenz sich in die unteren Schichten fortpflanzt und in die Masse der Kristalle, ähnlich wie in das Glas der Leydener Flasche eindringt. Dieser Spannungszustand ist als Ursache der auftretenden elektromotorischen Kraft anzusehen.

Uljanin (98) nahm zur Erklärung der photoelektrischen Ströme an, daß die Selenpräparate aus einem Gemenge mehrerer Selenmodifikationen bestehen; darunter sind folgende zwei: a) Lichtempfindliche Modifikation, die vom Lichte in eine andere übergeführt wird, b) Elektrolytische Teilchen, von denen unentschieden gelassen wird, ob es sich um eine Lösung zweier Selenmodifikationen in einander oder um Selenide handelt. Das Licht soll die lichtempfindlichen Teilchen in andere überführen, die positiv gegen die ersteren sind.

B.

Die Anwendungen des Selens in der Elektrotechnik.

Die Selenzelle gestattet rasch wechselnde Lichteindrücke in entsprechende Veränderungen eines elektrischen Stromes umzusetzen; mittels der Selenzelle findet also eine Umwandlung von Licht in Elektrizität statt. Unterschiede in der Beleuchtungsstärke, in der Helligkeit und Farbe von Körpern werden in Stromschwankungen und in elektrische Arbeitsleistung umgesetzt. Eine Selenzelle kann daher in Verbindung mit einem entsprechenden Apparat Arbeiten verrichten, die sonst menschlicher Hilfskräfte bedürfen.

Da die Selenzelle wechselnde Lichteindrücke nicht bloß nach ihrer Stärke, sondern in bestimmten Fällen auch nach ihrer Farbe unterscheiden kann, leistet sie in gewisser Beziehung dasselbe wie unser Auge. Daher wird die Selenzelle vielfach das „elektrische Auge" genannt und eine Maschine, deren Hauptbestandteil eine Selenzelle oder sonst eine lichtempfindliche Substanz ist, kann mit einem gewissen Recht als „sehende Maschine" bezeichnet werden. Bei diesen Maschinen ist die Einrichtung der Apparatur jener der menschlichen Gesichtsempfindung genau angepaßt. Das menschliche Auge bekommt von den in seiner Sehlinie befindlichen Dingen bei Belichtung Eindrücke, die durch den Sehnerv dem Gehirn als dem Sitze des Bewußtseins zugeführt und in tatsächliche Gesichtsempfindung umgesetzt werden. Wir ersetzen bei den sehenden Maschinen das Leben durch den elektrischen Strom, das Licht durch die elektrische Lampe, das Auge bezw. die Netzhaut durch die lichtempfindliche Selenzelle, den Sehnerv durch elektrische Stromleitungen, das Gehirn durch ein Meßinstrument für Stromstärken, die Kundgabe der Gesichtsempfindung durch Betätigung mechanischer Vorrichtungen.

Leider besitzt die Selenzelle nicht die gleiche Farbenempfindlichkeit wie unser Auge, auch ist sie sonst mit mehreren schweren Fehlern behaftet, so daß sie nur in beschränktem Umfange als Ersatz des Auges in Betracht kommen kann.

Es ist die Aufgabe der Elektrotechnik, die Selenfehler durch Kompensationen nach Möglichkeit zu beseitigen, um diesen merkwürdigen Stoff in möglichst großem Umfange dem Wohle der Menschheit dienstbar zu machen.

Es sollen nun zuerst die Hilfsmittel, die uns zur Beseitigung der Selenfehler zur Verfügung stehen, in ausführlicher Weise behandelt werden. Hierauf will ich die wichtigsten Anwendungen der Selenzelle beschreiben, wobei ich die Verwendung zu Thermoelementen und Kontaktdetektoren übergehe, da das Selen auf diesen Gebieten nur untergeordnete Bedeutung erlangt hat.

I. Hilfsvorrichtungen.

Die hohe Lichtempfindlichkeit des Selens wäre von großer Bedeutung für die Elektrotechnik, wenn sich ihr nicht schwere Fehler zugesellten. Als solche haben wir früher bereits die Trägheit (S. 131) und Inkonstanz (S. 35) des Selens erkannt. Glücklicherweise besitzen wir mehrere Hilfsvorrichtungen, durch die wir für viele Fälle diese Selenfehler unschädlich machen können. Ein wesentlicher Nachteil der Selenzelle ist ferner ihr großer Widerstand, der selbst bei Belichtung noch einen hohen Wert hat, so daß die durch die Selenzelle fließenden Ströme nur schwach und im allgemeinen nicht imstande sind, die nötigen Maschinen zu betätigen. Wir müssen uns daher verschiedener Hilfsvorrichtungen (Relais) bedienen, die eine Verstärkung des Lichteffektes gestatten.

a) Vorrichtungen zur Beseitigung der Trägheit und Inkonstanz des Selens.

Wir haben schon früher darauf hingewiesen, daß die störende Eigenschaft der Trägheit durch entsprechende Konstruktion der Zellen, durch Anlegen einer geeigneten Spannung sowie durch Vorbelichtung wesentlich herabgemindert werden kann. Wir wollen nun die Schaltungen besprechen, mittels der man in der Technik die Trägheitserscheinungen zu beseitigen versucht.

In erster Linie ist hier der Selenkompensator von Korn (276) zu nennen, bei dem 2 Zellen vorhanden sind, von denen die zweite nur Korrekturen im Verlaufe des Stromes der ersten auszuführen hat. Die Schaltung ergibt sich aus Fig. 154. B_1 und B_2 sind zwei gleiche Batterien, S_1 und S_2 zwei Selenzellen, während in der Brücke das Saitengalvanometer G (S. 74) liegt. Dieses besteht aus 2 zwischen den Polen eines Elektromagnets ausgespannten Metallbänd-

chen, auf die ein kleines Aluminiumplättchen geklebt ist. Geht durch das Galvanometer ein Strom, so wird das Aluminiumplättchen abgelenkt und läßt von einer dahinter befindlichen Lichtquelle Strahlen auf die Selenzelle S_2 fallen. Je größer die Ablenkung des Plättchens, desto mehr Licht geht durch und desto größer ist die Beeinflussung der Zelle S_2.

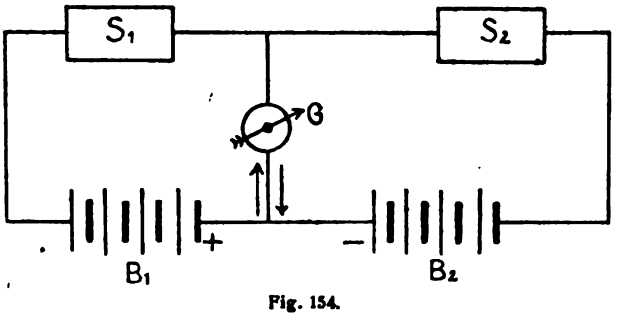


Fig. 154.

Die Einrichtung ist nun so getroffen, daß kein Strom durch die Brücke und das Galvanometer G geht, wenn S_1 und S_2 im Dunkeln liegen. Belichtet man S_1, während S_2 im Dunkeln liegt, so fließt ein Strom von B_1 in der Richtung des linken Pfeiles durch die Brücke; belichtet man aber S_2 und verdunkelt S_1, so geht ein entgegengesetzt gerichteter Strom durch G.. Folglich müßte bei gleichzeitiger und gleich starker Belichtung beider Selenzellen, vorausgesetzt daß dieselben gleiche Eigenschaften, insbesondere gleiche Empfindlichkeit besitzen, die Brücke mit dem Galvanometer stromlos bleiben. Schaltet man aber zwei Selenzellen verschiedener Art ein, von denen die eine S_1 große Empfindlichkeit und geringe Trägheit, die andere S_2 aber geringe Empfindlichkeit und größere Trägheit besitzen möge, so erhält man bei gleich starker Belichtung beider Zellen einen Differenzstrom in der Brücke und zwar zeigt derselbe wesentlich geringere Trägheitserscheinungen als jeder der beiden Ströme. Diese Tatsache erkennt man ohne weiteres aus Fig. 155.

Setzt man die Zelle S_1 allein kurze Zeit dem Lichte aus, um dann wieder zu verdunkeln, so nimmt der Strom den durch Kurve S_1 dargestellten Verlauf. Belichtet man die zweite Zelle allein, so verläuft der Strom im Sinne der Kurve S_2, die hier negativ aufgetragen wurde, da die Stromrichtung die entgegengesetzte ist. Subtrahiert man die Ordinanten der beiden Kurven, so erhält man die Differenzkurve, die den Verlauf des Brückenstromes bei gleichzeitiger und gleichstarker Belichtung der beiden Zellen veranschaulicht. Man

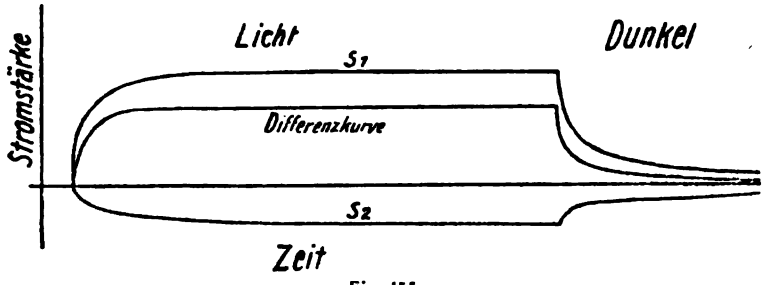


Fig 155.

sieht sofort, daß der Strom rasch ansteigt, sich stets so ziemlich auf gleicher Höhe hält und bei Verdunkelung viel rascher gegen den Nullpunkt zurückgeht, was eine wesentliche Verminderung der Trägheit bedeutet.

Der Vorgang bei dem Selenkompensator ist nun folgender. Fallen Lichtstrahlen auf die Zelle S_1, so wird deren Widerstand kleiner und es fließt ein Strom durch das Galvanometer. Infolge der Ablenkung des Aluminiumplättchens erhält auch S_2 Licht und zwar ist die Lichtstärke immer proportional dem Strom in der Brücke. Dadurch wird der Widerstand von S_2 herabgesetzt und es fließt ein dem früheren entgegengesetzter Strom in die Brücke, so daß nur mehr eine Differenzwirkung vorhanden ist. Durch entsprechende Anordnung der einzelnen Teile ist es gelungen, die wirklich in der Brücke entstehenden Ströme den augenblicklichen Belichtungen der Zelle S_1 proportional zu machen, so daß die Stromschwankungen in der Brücke genau den Schwankungen des auf S_1 fallenden Lichtes entsprechen.

Zavada (387) schlägt vor, die beiden gegengeschalteten Zellen bei der Kornschen Anordnung durch ein und dieselbe Lichtquelle rasch hintereinander zu belichten. Verwendet man dann 2 gleiche Selenzellen, so wird der durch Belichtung von S_1 erzielte Ausschlag des Galvanometers im nächsten Moment durch den entgegengesetzten Strom auf Null zurückgeführt. Die abwechselnde Belichtung bewirkt Zavada mit einer undurchsichtigen Spiegelscheibe (Fig. 156), die mit Öffnungen versehen ist. Die Öffnungen und die undurchsichtigen Stellen der Scheibe haben die gleiche Breite. Rotiert die Spiegelscheibe, so wird das Licht einmal nach der Selenzelle S_1 durchgelassen, das andere Mal von der Spiegelscheibe nach der Selenzelle S_2 reflektiert. Man kann die beiden Zellen auch dicht nebeneinander hinter der Scheibe aufstellen; rotiert die Scheibe, so werden die Zellen intermittierend beleuchtet. Dabei trifft bei einer Zelle gerade die volle Beleuchtung auf, während die andere gänzlich verdunkelt ist.

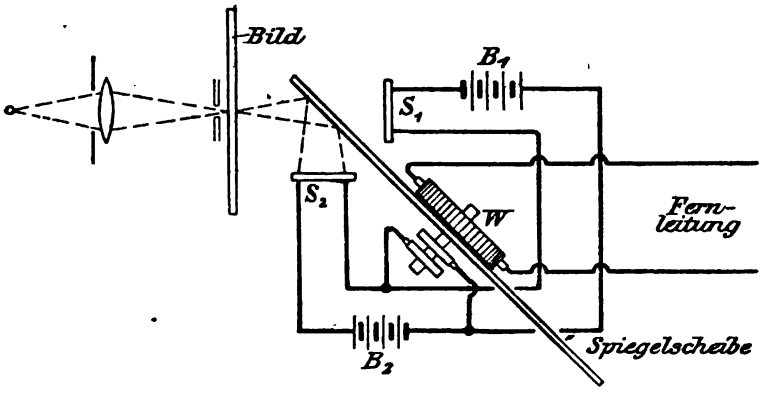


Fig 156.

Zavada bringt noch einen anderen Vorschlag zur Beseitigung der Trägheit (Fig. 157). Die Selenzellen F und K liegen in 2 gesonderten Stromkreisen, die miteinander induktiv gekoppelt sind. In der Fernleitung lagert sich dann über den Strom der Fühlerzelle F der transformierte Strom der Korrekturzelle K. In diesem Falle werden die beiden Selenzellen gleichzeitig belichtet. Die Korrekturzelle soll größere Trägheit besitzen als die Fühlerzelle, damit sie ziemlich lange nach erfolgter Beleuchtungsänderung Strom in die Fernleitung senden kann; dies läßt sich angenähert auch dadurch erreichen, daß man 2 gleiche Zellen verwendet und vor die Fühlerzelle F ein grünes, vor die Korrekturzelle K ein rotes Lichtfilter (Glasplatte) stellt.

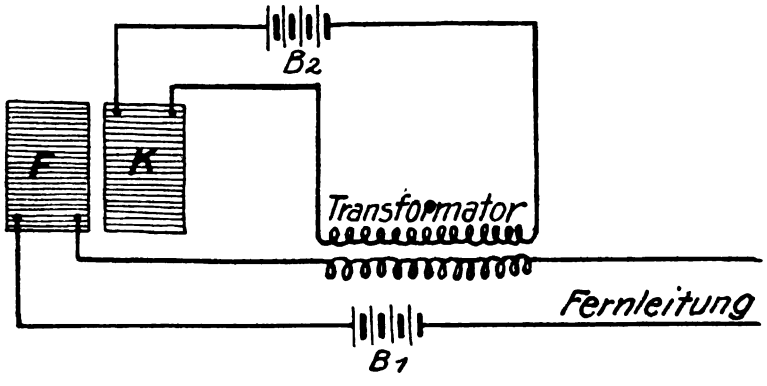


Fig. 157.

Schließlich schlägt Zavada vor, in Fällen, in denen nicht der Grundstrom und seine allmähliche Änderung, sondern lediglich die bei Belichtungsänderungen entstehenden Stromschwankungen zum Ausdruck kommen sollen, intermittierende Beleuchtung anzuwenden und den Grundstrom zu kommutieren. Dabei setzt man den Stromwender (Kommutator) auf die Achse der lichtunterbrechenden Scheibe auf und kom-

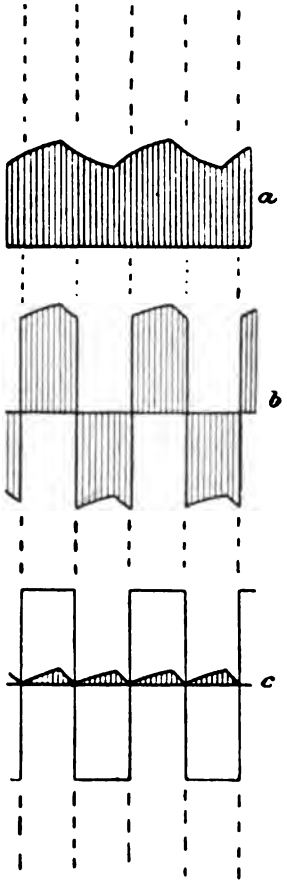


Fig. 158.

mutiert den Strom so oft, als Beleuchtung und Verdunkelung wechseln. Kurve a in Fig. 158 zeigt uns die Stromschwankungen bei intermittierender Beleuchtung; der Strom wächst bei Belichtung und sinkt bei Verdunkelung und pendelt bei raschem Wechsel von Licht und Dunkel zwischen zwei Grenzwerten hin und her. Aus Kurve b ersehen

wir den Verlauf des Stromes, wenn dieser kommutiert wird. Die von oben nach unten führenden punktierten Linien geben uns den Moment an, in dem die Stromänderung eintritt. Durch den Kommutator wird also der Grundstrom in einen Wechselstrom umgewandelt. Betrachten wir nun die zwei Kurven c! Die fein ausgezogene veranschaulicht den Verlauf eines Wechselstroms, während die andere kleinere Schwankungen eines Stroms darstellt. Treten diese beiden Ströme in einer Leitung gleichzeitig auf, so entsteht offenbar ein Strom, dessen Verlauf durch Kurve b dargestellt ist. Folglich ist der durch intermittierende Beleuchtung und Kommutation entstandene Strom, wie er durch Kurve b veranschaulicht wird, gleich einem Wechselstrom, über den sich Stromschwankungen von der in Fig. c gezeichneten Form lagern. Schaltet man demnach in den Stromkreis ein Gleichstrominstrument ein, so zeigt dieses nur die Stromschwankungen an, da es auf den Wechselstrom nicht reagiert.

W e i g l (412) bediente sich der Wheatstoneschen Brückenschaltung (Fig. 159) zur Beseitigung der Trägheit. S_1 und S_2 sind zwei möglichst gleiche Selenzellen, während W_1 und W_2 zwei Vergleichswiderstände bedeuten, die derart abgeglichen

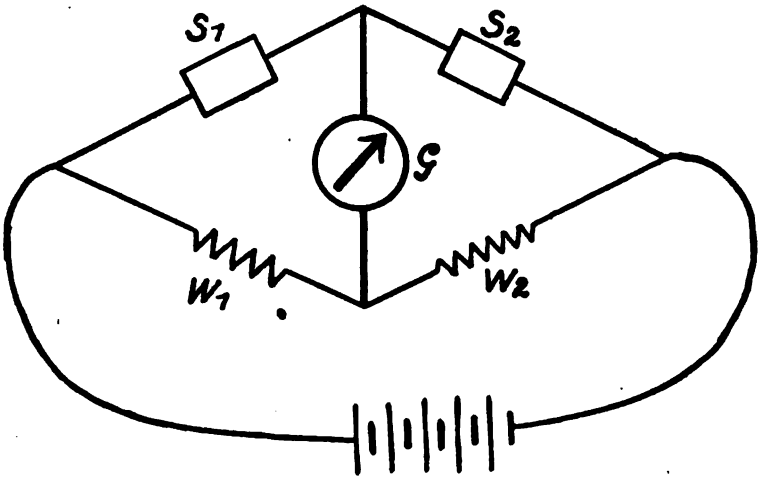


Fig. 159.

sind, daß die Brücke mit dem Galvanometer stromlos ist, so lange die Selenzellen im Dunkeln liegen. Die beiden Zellen werden immer durch ein und denselben Lichtstrahl nacheinander gleich lang belichtet. Da die Belichtung der einen Zelle einen Galvanometerausschlag im positiven Sinne, die

Belichtung der anderen Zelle aber im negativen Sinne hervorruft, so erhält das Galvanometer durch jeden Lichtstrahl rasch hintereinander zwei ziemlich gleiche, entgegengesetzt wirkende Impulse, so daß es nach jeder Belichtung rasch auf Null zurückgebracht wird.

Ich (494) habe einen Apparat konstruiert, der nicht bloß die Trägheit, sondern auch die Inkonstanz des Selens ausschaltet. Die Konstrukteure von Selenapparaten haben bisher vielfach die Inkonstanz der Selenzelle wenig beachtet. Es kam ihnen meist nur darauf an, durch einen Demonstrationsapparat den Nachweis zu erbringen, daß ihre Vorrichtung in der gewünschten Weise auf Lichteindrücke reagiert. Vielfach hörte man dann später, daß sich die Einrichtung in der Praxis nicht bewährt hat, oder es kam der Apparat infolge seiner unbefriedigenden Leistungen während der Probezeit überhaupt nicht zur Einführung. Und doch hatte er bei der Demonstration so wunderbar funktioniert! Die Ursache dieser Erscheinung lag fast immer in der Inkonstanz der Selenzelle. Infolge der im Laufe der Zeit sich vollziehenden Änderungen des Dunkelwiderstandes und der Lichtempfindlichkeit ändern die Grundströme im Selen allmählich ihre Stärke, so daß selbst bei gleichen Lichteindrücken die Wirkungen zu verschiedenen Zeiten recht verschieden ausfallen können. Die Veränderungen des Grundstromes lassen sich nicht lediglich durch Wärmedifferenzen, hygroskopische Eigenschaften des Selens oder Nachwirkung des Lichtes erklären, man kann vielmehr selbst bei Ausschaltung aller äußeren Einflüsse Leitfähigkeitsänderungen feststellen, die auf inneren Umlagerungen und Verschiebungen beruhen. Man kann wohl durch Beimengung von Metallzusätzen zu reinem Selen die Einstellung des Widerstandes in einen Gleichgewichtszustand beschleunigen; es treten aber immer noch im Laufe der Zeit, teils allmählich, teils oft unerwartet, Änderungen des Widerstandes und der Lichtempfindlichkeit einer Selenzelle auf. Man hat meines Erachtens bisher viel zu wenig Sorgfalt auf die Ausschaltung dieses Fehlers verwendet, obwohl die schlimmen Erfahrungen mit Selenapparaten zweifellos in der Hauptsache gerade auf diesen Fehler zurückzuführen sind. Bei meiner Vorrichtung spielt selbst eine größere Änderung des Grundstromes d. h. des bereits in der Dunkelheit durch die Zelle fließenden Stromes keine Rolle, da der Apparat nur mit dem Differenzstrom von Licht und Dunkel arbeitet, weshalb er auch den Namen Differentialrelais führt. Zudem ermöglicht das Differentialrelais die Ausnützung der kleinsten Lichteindrücke, so daß auch die Trägheit vollständig ausgeschieden wird. Die genaue Beschreibung der Vorrichtung muß infolge der gegenwärtigen Verhältnisse auf spätere Zeit verschoben werden.

b) Vorrichtungen zur Verstärkung des Lichteffektes (Relais, Zwischenklisches).

Da die Selenzelle einen sehr hohen Widerstand hat, fließt selbst bei Anwendung hoher Spannungen nur ein recht schwacher Strom durch den Stromkreis, dem die Selenzelle angehört. Bei schwachen Lichteindrücken ist daher der durch die Zelle gehende Strom nicht imstande größere Arbeitsleistungen zu vollbringen. Steht aber eine starke Lichtquelle zur Verfügung, so ist die Anwendung einer hohen Spannung sehr gefährlich, da sie leicht zur Zerstörung der Zelle bei Belichtung führen kann. Daher werden wir uns für alle Fälle mit schwachen Selenströmen begnügen müssen.

Da nun die beim Wechsel von Licht- und Dunkel auftretenden Selenströme nicht imstande sind, die für technische Zwecke nötigen Apparate selbst zu betätigen, müssen wir ein Vorspann, ein sogenanntes Relais, benützen. Dieses enthält eine Vorrichtung, welche die Übertragung der im Selenstromkreis auftretenden schwachen Stromschwankungen auf einen zweiten stärkeren Stromkreis gestattet. Wir unterscheiden im allgemeinen 2 Gruppen von Relais. Bei der ersten Gruppe wird durch eine hochempfindliche Vorrichtung, die nur eine geringe Bewegung zu machen hat, um einen 2. Stromkreis zu schließen, bei jeder Belichtung der Selenzelle ein konstanter Strom eingeschaltet, bei Verdunkelung wieder unterbrochen oder umgekehrt. Ein solches Schaltrelais gestattet also Lichteindrücke in Stromstöße von stets gleicher Intensität umzusetzen, so daß die Stärke der Lichteindrücke nicht weiter zum Ausdruck kommt. In der Konstruktion derartiger Apparate hat man es bereits zu hoher Vollendung gebracht. Weit schwerer ist die Erfüllung der Anforderung, die an die 2. Gruppe der Relais gestellt wird; sie besteht darin, die Stromschwankungen ihrer Intensität entsprechend auf einen zweiten stärkeren Stromkreis zu übertragen und zu verstärken. Diese Aufgabe ist von der Elektrotechnik noch nicht zur Zufriedenheit gelöst. Gelingt es, die raschen Stromschwankungen, die sich in der Selenzelle vollziehen können, durch ein einfaches Relais entsprechend zu verstärken, so lassen sich gewaltige Probleme mit der Selenzelle lösen.

Die Anforderungen, die wir an ein Relais stellen, sind außerordentlich hoch. Es soll sehr empfindlich für den elektrischen Strom und dabei möglichst unempfindlich gegen Stoß sein; es soll in der Sekunde auf möglichst viele Stromschwankungen reagieren; es soll einfach in der Konstruktion und billig sein.

Die Einrichtung eines einfachen Relais ist in der Fig. 160 angegeben. Man leitet den schwachen Strom mittels der Drähte a und b durch den Elektromagnet M, der den

hochempfindlichen Anker A ein wenig anzieht. Nun wird der Hebel um D gedreht und der untere Hebelarm berührt die Schraube R. Dadurch wird ein eigener Stromkreis geschlossen; von der starken Batterie B fließt nämlich jetzt ein kräftiger Strom durch c über S und D nach R und weiterhin durch d über E zur Batterie zurück. In der Figur bedeutet E einen Elektromagnet, der kräftig erregt wird und Arbeit leistet; an seine Stelle kann natürlich irgend ein anderes elektrisches Instrument, das vom Strom beeinflußt wird, gesetzt werden.

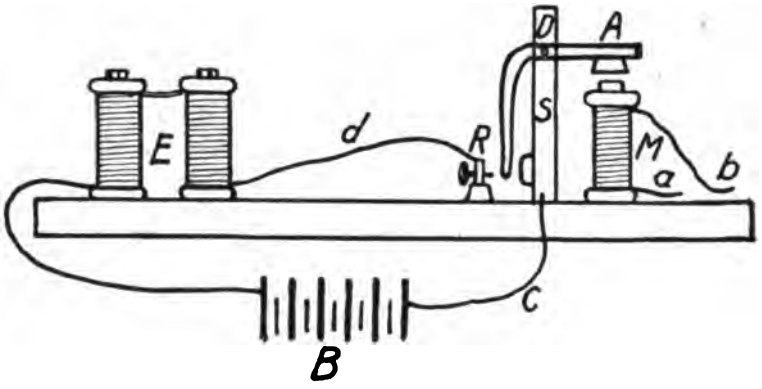


Fig. 160.

Fig. 161 stellt eine einfache Schaltung für ein derartiges Relais dar. Wir haben zwei Stromkreise. Die Batterie I

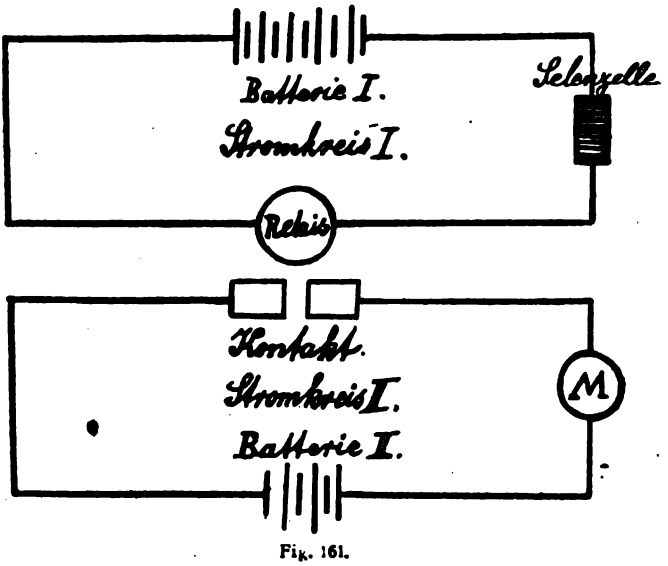


Fig. 161.

ist mit der Selenzelle und dem Relais verbunden; die Batterie II steht mit dem zu betätigenden Apparat M und einer Kontaktvorrichtung in Verbindung. So lange die Selenzelle nicht beleuchtet, z. B. in einem dunklen Kästchen eingeschlossen ist, fließt nur ein sehr schwacher Strom durch den Stromkreis I, so daß das Relais nicht in Tätigkeit tritt; da die Kontaktvorrichtung nicht geschlossen ist, bleibt der Stromkreis II stromlos. Fallen aber Lichtstrahlen auf die Selenzelle, so wächst die Stromstärke im Stromkreis I rasch an, die Relaiszunge schlägt aus und schließt den Kontakt und somit den Stromkreis II, so daß die Maschine betätigt wird.

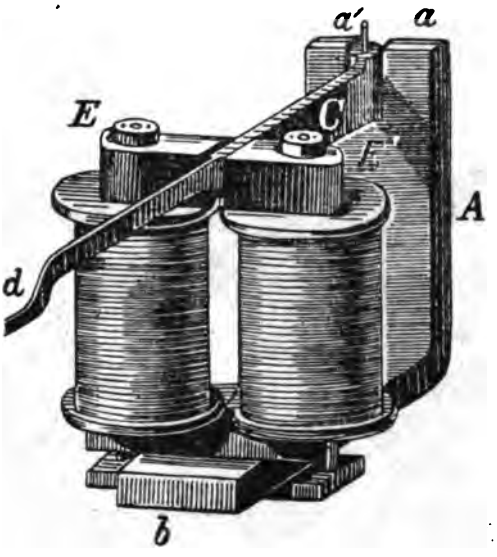


Fig. 162.

Größere Empfindlichkeit hat das polarisierte Relais (Fig. 162). Bei diesem wird durch den schwachen Selenstrom der Magnet nicht erst erregt, sondern es werden vorhandene Magnetpole lediglich verstärkt oder geschwächt. a A b ist ein rechtwinklich gebogener Stahlmagnet, der bei aa' seinen Südpol, bei b seinen Nordpol hat. Auf letzterem sitzen zwei weiche Eisenzylinder, die ebenfalls nordmagnetisch sind und oben in 2 einander direkt gegenüberstehende Nordpole EE' endigen. Die beiden Eisenzylinder sind mit Drahtwickelungen umgeben. Der Südpol ist bei aa' aufgeschlitzt; in dem Zwischenraum ist der aus weichem Eisen bestehende Hebel Cd, der ebenfalls südmagnetisch ist, drehbar angebracht. Geht kein Strom durch die Drahtwickelungen, so befindet sich der südmagnetische Hebel Cd zwischen den beiden Nordpolen EE'

im Gleichgewicht. Fließt aber der Selenstrom in solcher Richtung durch die beiden Drahtwickelungen, daß der eine Magnetpol z. B. E stärker, der andere schwächer nordmagnetisch wird, dann wird der Hebel Cd von E angezogen und schließt durch Berührung eines Stiftes den 2. Stromkreis. Man kann die Einrichtung so treffen, daß der Hebel bei eintretender Schwächung des Selenstromes von selbst zurückschnellt und den Kontakt aufhebt.

Polarisierte Relais, die auf Ströme von 1 bis 2 Milliamp. noch reagieren, sind ohne Schwierigkeit herzustellen. Ein derartiges Relais gibt in der Sekunde 15 bis 20 mal Kontakt, ermöglicht also ein sehr rasches Arbeiten.

Ein hochempfindliches polarisiertes Relais mit möglichst kleinen schwingenden Massen baut die Gesellschaft für drahtlose Telegraphie „Telefunken“ (Fig. 163).

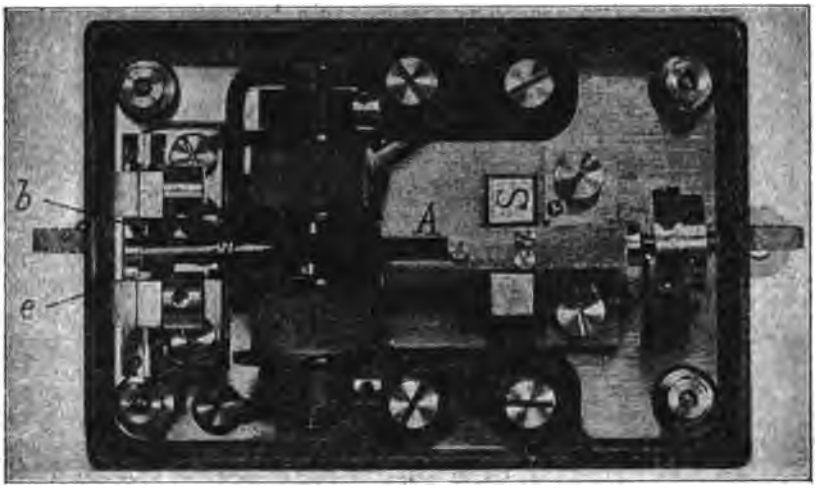


Fig. 163.

Sehr empfindlich sind die Drehspulrelais, die nach Art der Drehspulgalvanometer gebaut sind. Die Pole eines Hufeisenmagnetes (Fig. 164) sind mit zylindrisch ausgeschnittenen Polschuhen aus weichem Eisen versehen. Innerhalb des zylindrischen Raumes befindet sich ein Eisenzylinder E, so daß nur ein ringförmiger Zwischenraum bleibt, in dem eine Drahtspule S beweglich angebracht ist. Läßt man den Strom durch die Spule, so wird sie vom Magnet abgelenkt und zwar ist die Ablenkung, die der Zeiger Z anzeigt,

innerhalb gewisser Grenzen proportional der Stromstärke. Verwendet man den Zeiger dazu, einen Kontakt zu schließen, so hat man ein sehr empfindliches Relais, da die Drehspulgalvanometer große Empfindlichkeit zeigen, selbst wenn sie mit Zeiger ausgerüstet sind.

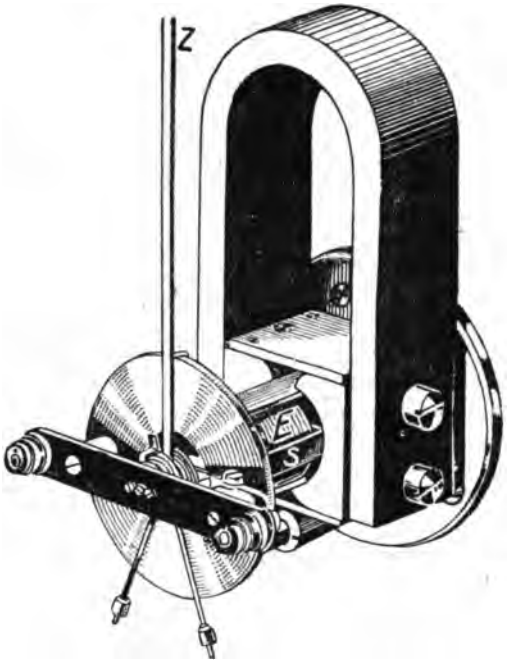


Fig. 164.

Drehspulrelais geben noch bei Strömen von der Größenordnung 10^{-6} Amp. Kontakt. Da die Schwingungsdauer des beweglichen Systems mit wachsender Empfindlichkeit zunimmt und das System gedämpft sein muß, damit sich der bewegliche Kontakt ohne Klirren an den festen Kontakt legt, kann bei der angegebenen Empfindlichkeit von 10^{-6} Amp. von einer schnellen Einstellung keine Rede sein. Zur Zeit werden Drehspulrelais hergestellt, die bei einer Empfindlichkeit von etwa $6 \cdot 10^{-6}$ Amp. eine Schwingungsdauer von 2 Sekunden, bei einer Empfindlichkeit von ca. $2 \cdot 10^{-5}$ Amp. eine Schwingungsdauer von 0,5 Sekunden haben. Es läßt sich also mit einem Relais der letzten Art in der Sekunde ein zweimaliger Kontakt erreichen.

Das Selenrelais schließlich gestattet selbst bei den schwächsten Lichteindrücken einen Kontakt zu schließen und

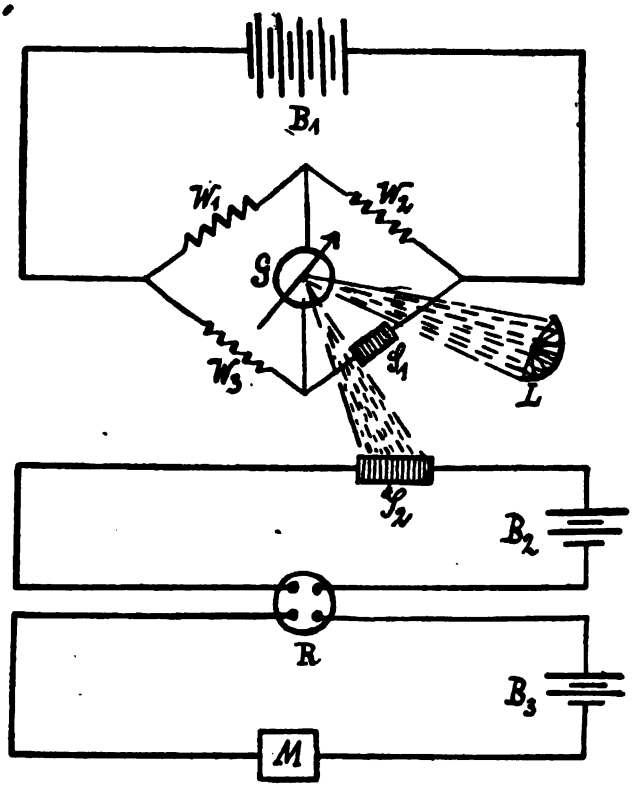


Fig. 165.

eine Maschine in Tätigkeit zu setzen. Die Versuchsanordnung ist in Fig. 165 abgebildet. Wir verwenden hier ein Spiegelgalvanometer höchster Empfindlichkeit; derartige Instrumente vermögen noch einen Strom von 10^{-12} Ampere, d. h. von 1 Billiontel Ampere anzuzeigen. Als Schaltung benützt man die Brückenform. Hat man die Widerstände W_1, W_2, W_3 derart abgeglichen, daß die Brücke bei Verdunkelung von S_1 stromlos ist, so schlägt das Galvanometer G sofort wieder aus, sobald auch nur der geringste Lichtschein auf die Selenzelle S_1 fällt. Dem Galvanometerspiegel gegenüber steht eine kräftige Lichtquelle L, deren Strahlen durch den Spiegel gegen die zweite Selenzelle S_2 zurückgeworfen werden können. Ist das Galvanometer G stromlos, so gehen die Lichtstrahlen an der Selenzelle S_2 vorbei; fällt aber irgend ein Lichtschein auf S_1, so daß ein Strom durch das Galvanometer fließt, dann wird der Spiegel abgelenkt und das von L kommende Lichtbündel gegen die Selenzelle S_2 reflektiert. Dadurch wird der Widerstand der Zelle S_2 kräftig herabgesetzt,

so daß der Strom der Batterie B_2 ein gewöhnliches Relais R betätigen kann; nun wird der Kontakt K geschlossen und die Maschine M durch die Batterie B_3 in Tätigkeit gesetzt.

Die genannten Relais vermögen bei Belichtung bezw. Verdunkelung der Selenzelle einen zweiten Stromkreis von stets gleich bleibender Stärke zu schließen oder auch zu öffnen. Die Stärke der Selenströme kommt dabei nicht zum Ausdruck; es ist nur nötig, daß der Selenstrom eine gewisse Mindeststärke besitzt, die zur Betätigung des Relais eben noch ausreicht. Der 2. Stromkreis besitzt bei jeder Stromschließung dieselbe Stärke. Von besonderem Wert wäre natürlich ein Relais, das die auftretenden Selenströme proportional vergrößerte, also z. B. 1000 mal so stark machen könnte, so daß ein Selenstrom von 0,2 Milliamp. in einen Strom von 0,2 Amp., ein Selenstrom von 1 Milliamp. in einen solchen von 1 Amp., kurz alle Schwankungen des Selenstromes in 1000 mal so starke umgesetzt würden. Ein einfaches Relais dieser Art besitzen wir zur Zeit leider noch nicht. Man könnte daran denken, das Drehspulrelais derart auszugestalten, daß der Zeiger, dessen Ausschläge innerhalb gewisser Grenzen doch der Stromstärke proportional sind, je nach seiner Stellung verschiedene Kontakte macht und dadurch Stromkreise von genau n mal so großer Stromstärke schließt. Die hauptsächlichsten Schwierigkeiten, denen die Ausführung eines solchen Relais begegnet, liegen darin, daß die Reibung des Zeigers an den Kontaktstellen seine Beweglichkeit hemmt und daß die Kontakte unzuverlässig sind.

Man kann nun in manchen Fällen den Kunstgriff anwenden, daß man die Schwankungen des Selenstromes auf einem fortlaufenden Streifen registriert und das erhaltene Bild, das Zwischenklische, dazu benützt, verschieden große elektromotorische Kräfte einzuschalten. Diese Methode der Zwischenklisches wurde zuerst von Fortong (209) zur Bildübertragung vorgeschlagen; es soll jedoch hier zuvor eine einfachere Anregung von Adamian (262) besprochen werden.

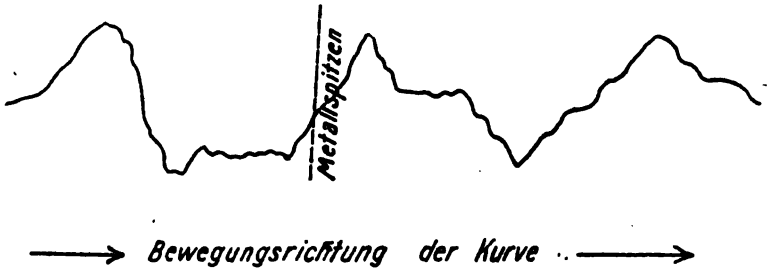


Fig. 166.

Adamians Vorschlag geht dahin, die schwachen Selenströme zur Aufzeichnung einer Stromkurve auf einem fortlaufenden Streifen zu benutzen. Wenn man die Lichtkurve (S. 73) aus leitender Substanz auf einem nichtleitenden Streifen herstellt und dann unter einem aus mehreren Metallspitzen bestehenden Kamm vorbeizieht, so kommen beim Fallen oder Steigen der Kurve immer andere Metallspitzen mit der leitenden Kurve in Verbindung (Fig. 166). Dadurch kann man es erreichen, daß je nach der Lage bezw. Ordinate eines Kurvenpunktes verschiedene elektromotorische Kräfte eingeschaltet werden.

Fortong macht den beachtenswerten Vorschlag, die Selenströme zur Anfertigung von Lochstreifen (Fig. 167) zu benützen. Die kleinen Löcher von bestimmter Anordnung in dem dünnen Papierstreifen geben die Stromschwankungen sehr gut wieder. Bei der Umsetzung dieser Lochschrift werden, je nachdem gelochte oder ungelochte Teile des Papierstreifens an den vorhandenen Kontakträdchen vorbeiführen, elektrische Ströme geöffnet und geschlossen; diese betätigen dann die entsprechenden Apparate.

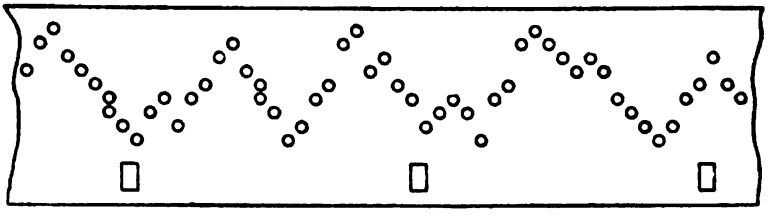


Fig. 167.

Da Fortong die Selenströme selbst zur Anfertigung von Lochstreifen verwenden wollte, war ein Erfolg infolge der zu geringen Stärke dieser Ströme natürlich ausgeschlossen. Dagegen hat Korn in den letzten Jahren durch Anwendung von Lochstreifen bei der Bildtelegraphie sehr gute Erfolge erzielt, indem er die Selenströme erst durch ein eben zu diesem Zweck erfundenes Relais, das Stufenrelais, entsprechend verstärkte.

Das Stufenrelais von Korn (442, 443) gestattet zwar nicht alle möglichen Ströme proportional zu vergrößern, aber es kommt der Lösung dieses Problems insofern näher, als es wenigstens ermöglicht, verstärkte Ströme in gewissen Abstufungen zu erhalten. Die Selenströme werden in eine Anzahl von Stufen geteilt. Wenn z. B. die zur Verfügung stehenden Selenströme im Maximum ein Milliampere betragen und

man 10 Stufen wählt, so kann man folgende Abstufungen und Verstärkungen vornehmen:

Abstufung der Selenströme				Verstärkung
1. Stufe	0	bis	0,05 Milliamp.	—
2. Stufe	0,05	bis	0,15 Milliamp.	a mal
3. Stufe	0,15	bis	0,25 Milliamp.	2 a mal
. . . . .				
9. Stufe	0,75	bis	0,85 Milliamp.	8 a mal
10. Stufe	0,85	bis	1 Milliamp.	9 a mal

Je nach der Wahl der konstanten Größe a kann man die Abstufungen entsprechend ändern.

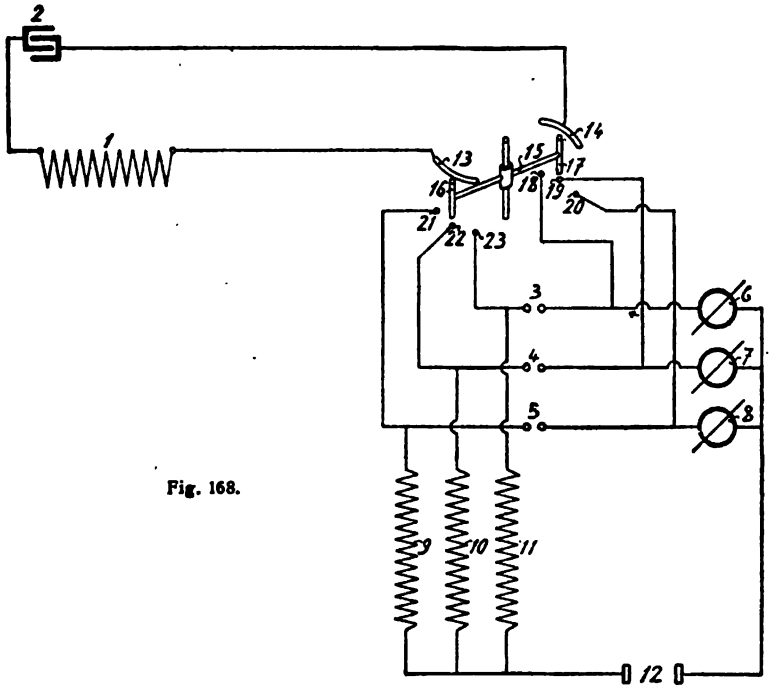


Fig. 168.

Fig. 168 veranschaulicht die Anordnung der einzelnen Teile. Der Zeiger 15 eines Galvanometers, der aus nichtleitendem Material besteht, trägt an seinen Enden zwei dünne Metallstifte 16 und 17, die unter den leitenden Plättchen 13 und 14 und über zwei Kämmen sich frei bewegen. Letztere bestehen aus abwechselnd leitenden und nichtleitenden Blättchen, von denen in der Figur nur drei leitende Blättchen 21, 22, 23 einerseits, 18, 19, 20 andererseits angedeutet sind. Die Blättchen 13 und 14 stehen mit den Polen der Sekundärspule

eines Teslatransformators 1 und dem Kondensator 2 in Verbindung, während die leitenden Blättchen 21, 22, 23 bezw. mit 20, 19, 18 unter Einschaltung der Funkenstrecken 5, 4, 3 verbunden sind. An die Funkenstrecken sind ferner mittels der Batterie bezw. Maschine 12 geeignete Spannungen angelegt. Steht nun, wie es in der Figur gezeichnet ist, der Galvanometerzeiger über 22 bezw. 19, so werden die hochgespannten Teslaströme zur Funkenstrecke 4 geleitet. Nun haben die Teslaströme die Eigenschaft, Starkstrombogen zu zünden; daher kann bei der Funkenstrecke 4 der von 12 kommende Starkstrom übergehen und den eingeschalteten elektromechanischen Apparat 7 betätigen. Es wird ein Starkstrombogen immer nur über diejenige Funkenstrecke gezündet, zu der die Teslaströme je nach der Stellung des Zeigerinstrumentes geleitet werden. Den Teslaströmen wird durch die Selbstinduktionsrollen 9, 10, 11 der Zugang zu 12 nach Möglichkeit erschwert. Da Starkstrombogen, die durch Gleichstromspannungen gezündet sind, nicht mehr verlöschen, wählt man die Gleichstromspannung bei 12 nur so groß, daß sie den Starkstrombogen nicht allein zünden kann, und nimmt eine Wechselstromspannung dazu. Wenn also z. B. bei 4 mittels der Zeigerstellung und der Teslaströme die Funkenstrecke erregt und durch die Wechselstromspannung der Starkstrombogen gezündet ist, geht über 4 auch der Gleichstrom ohne größeren Widerstand hinweg und betätigt den zugehörigen Apparat 7. Auf diesem Wege kann man also wesentlich verstärkte Ströme in bestimmten Abstufungen erhalten.

Eine mäßige Verstärkung schwacher Ströme gestattet das Lichtrelais von Korn (276). Dieses besteht aus einem Saitengalvanometer (Fig. 169) d. h. zwei zwischen den Polen

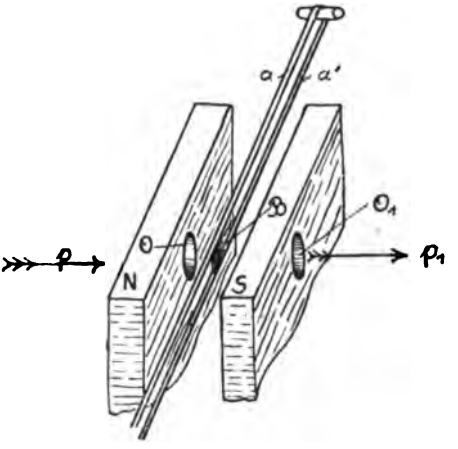


Fig. 169.

eines Elektromagnets NS gespannten Metallbändchen aa', auf die ein kleines Aluminiumblättchen B geklebt ist. Die Polschuhe des Magnets enthalten 2 Öffnungen O und O_1, durch welche Lichtstrahlen in der Richtung der Pfeile p p_1 hindurchgesandt werden können. Je nach der Richtung und Stärke der durch die Metallbändchen a a' hindurchgeleiteten Ströme wird das Aluminiumplättchen mehr oder weniger nach oben oder unten abgelenkt. Solange kein Strom durch die Metallbändchen fließt, schneidet das Aluminiumblättchen den durch O fallenden Lichtstrahl vollständig ab; geht aber ein Strom hindurch, so wird je nach der Stärke des Stromes bezw. der Größe der Ablenkung des Aluminiumblättchens mehr oder weniger Licht durch O_1 hindurchgelassen. Das hindurchgehende Licht kann auf einen Punkt konzentriert und auf einem fortlaufenden Film photographiert werden; die Helligkeitsunterschiede des entstehenden Linienzuges entsprechen dann den Schwankungen des durch das Relais gegangenen Stromes. Man kann aber auch an Stelle des Films eine mit einer kräftigen Stromquelle verbundene Selenzelle bringen, die je nach den Ausschlägen des Aluminiumblättchens mehr oder weniger Licht erhält und somit mehr oder weniger Strom hindurchläßt. Es können also auf diesem Wege rasch aufeinanderfolgende Änderungen eines schwachen Stromes in Lichtschwankungen und diese wieder in Schwankungen eines zweiten Stromkreises umgesetzt werden. Da aber dieser selbst wieder eine Selenzelle enthält, kann die Verstärkung nur mäßig sein, so daß sie für die meisten Zwecke nicht ausreicht. Soll mit dieser Vorrichtung ein Vorteil erzielt werden, so muß unter sonst gleichen Umständen die Hilfslichtquelle, deren Strahlen durch die Öffnung des Lichtrelais hindurch auf die zweite Selenzelle konzentriert werden, recht kräftig und der Unterschied in der Beleuchtungsstärke der beiden Selenzellen möglichst groß sein.

Bei dem **Mikrophonrelais** kommt die Eigenschaft loser Kontakte, bei Druckänderungen ihren Widerstand zu ändern, in Anwendung. Sendet man durch ein Mikrophon das im allgemeinen aus losen Kohlekontakten besteht, einen Gleichstrom und spricht gegen das Mikrophon, so werden durch die Schallschwingungen Veränderungen der Innigkeit der Berührung zwischen den Kohlen und dadurch Stromschwankungen hervorgerufen. Es lag nun der Gedanke nahe, ein in einem stärkeren Stromkreis liegendes Mikrophon dadurch zu beeinflussen, daß man die Kontaktstücke des Mikrophons mit magnetischen Teilchen versah und auf diese einen zweiten Strom einwirken ließ. So kann man nach dem Mikrophonprinzip die Schwankungen eines Stromes auf einen anderen stärkeren Strom übertragen. Das Mikrophonrelais

vermag sehr schnelle Stromschwankungen zu verstärken, ist aber gegen Erschütterungen außerordentlich empfindlich.

Das Resonanzrelais beruht auf der Tatsache, daß ein schwingungsfähiges System von schwachen Energiestößen eines Körpers in Schwingungen versetzt wird, wenn die Schwingungszahl des schwingungsfähigen Systems mit derjenigen des erregenden Körpers übereinstimmt.

Ein sehr kunstvoller Apparat zur Verstärkung schwacher Telephonströme ist das Lieben-Reiszsche Telephon- oder Gasentladungsrelais. Bei demselben läßt man die schwachen telephonischen Wechselströme auf die Geschwindigkeiten von Kathodenstrahlen einwirken, wodurch die in der Kathodenröhre übergehenden kräftigeren Ströme die gleichen Änderungen erfahren, wie sie die Telephonströme selbst aufweisen. Die Anordnung der Apparate ist aus Fig. 170 zu ersehen. G ist eine evakuierte Glasröhre, K

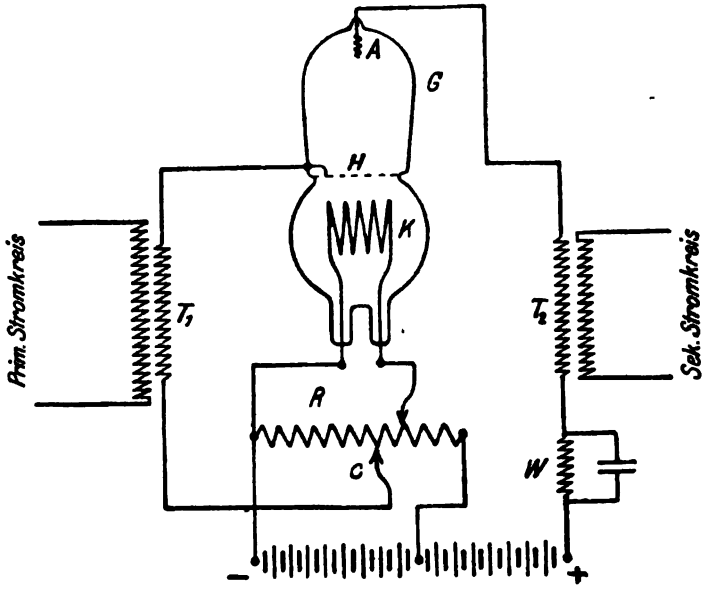


Fig. 170.

eine Wehneltkathode, A die Anode. Die Wehneltkathode K besteht aus einem dünnen Platinblech, das mit Barium- oder Calciumoxyd bestrichen ist und durch einen Heizstrom, der mittels des Regulierwiderstandes R von der Stromquelle abgezweigt werden kann, bis zur Rotglut erhitzt wird. Legt man an die Kathode K den negativen, an die Anode den positiven Pol einer Stromquelle von ca. 220 Volt an, so gehen von K Kathodenstrahlen d. h. Elektronen (negative kleinste

Elektrizitätsteilchen) von mäßiger Geschwindigkeit aus. Diese Elektronen ionisieren das Gas zwischen K und A und erhöhen dessen elektrische Leitfähigkeit. Verbindet man noch die durchlöcherte Metallplatte H einerseits, die Kathode K andererseits mit der Sekundärspule des Transformators T_1, durch dessen Primärspule die zu verstärkenden Telephonströme gehen, so wird die Geschwindigkeit der durch H fliegenden Elektronen beschleunigt, wenn H positiv wird, dagegen verzögert, so oft H negativ ist. Die zwischen H und A übergehenden Ströme ändern daher ihre Stärke in genau derselben Weise als die Telephonströme selbst. Die verstärkten Ströme können der Sekundärspule des Transformators T_2 entnommen werden. Das Telephonrelais gestattet die schwachen Wechselströme auf den 30—40fachen Betrag zu verstärken, und da es möglich ist, die verstärkten Ströme durch ein zweites Telephonrelais zu senden, und so fort, so kann die Verstärkung schwacher Ströme einen sehr hohen Grad erreichen.

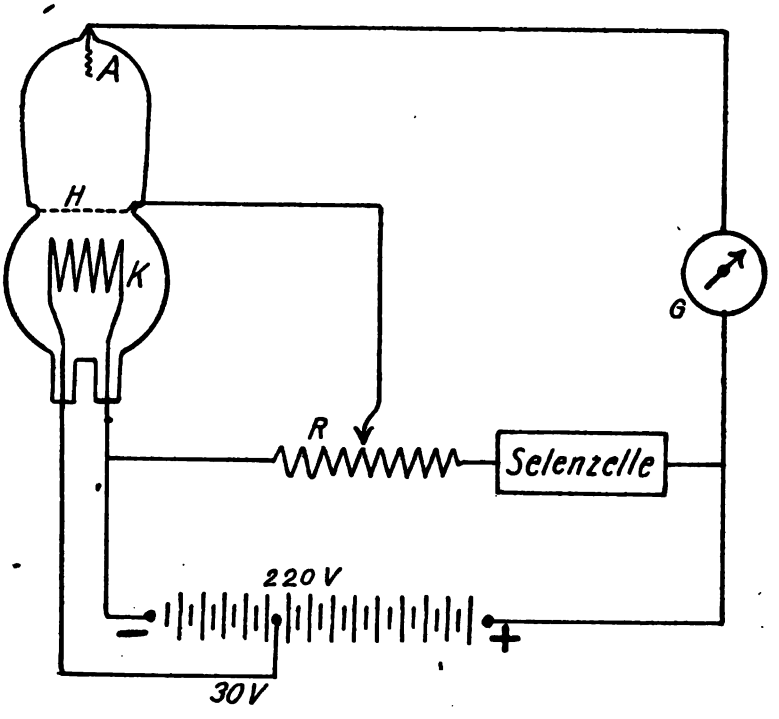


Fig. 171.

Fig. 171 zeigt das Gasentladungsrelais in der Schaltung mit einer Selenzelle. Hierbei muß von einer induktiven Wirkung auf den Stromkreis der Hilfselektrode abgesehen werden,

weil auch eine dauernde Belichtung der Selenzelle vom Relais wiedergegeben werden soll. Die bei wechselnder Belichtung auftretenden Widerstandsschwankungen der Selenzelle verursachen Spannungsänderungen der Hilfselektrode H und dadurch Stromschwankungen in der Entladungsröhre bezw. im Galvanometer G.

Zum Schlusse möchte ich nicht versäumen, auf das Differentialrelais (S. 226) nochmals hinzuweisen. Dasselbe reagiert nicht bloß auf schwache Lichteindrücke, sondern scheidet zugleich auch die Trägheit und Inkonstanz des Selens aus.

II. Lichtmessung (Photometrie).

Schon kurz nach der Entdeckung der Lichtempfindlichkeit des Selens haben Siemens (22) und Rolls (20) Versuche gemacht, die Selenzelle zur Lichtmessung heranzuziehen. Seit jener Zeit entstand eine ganze Reihe von sehr beachtenswerten Vorschlägen für die Konstruktion von Selenphotometern. Nach dem gegenwärtigen Stande darf man mit Recht behaupten, daß man mit der Selenzelle auf einfache Weise eine Genauigkeit in der Lichtmessung erzielen kann, die von dem besten Lichtmeßverfahren nicht übertroffen wird.

Die Stärke einer Lichtquelle bestimmen wir bekanntlich durch Vergleichung ihrer Wirkung mit einer anderen Lichtquelle, die wir als Einheit festsetzen und jederzeit in gleicher Weise wieder herstellen können. Es ist z. B. leicht möglich, Glühlampen herzustellen, die mit Gleichstrom von gleicher Spannung betrieben längere Zeit konstante Strahlung aufweisen und zwar sowohl quantitativ wie qualitativ, d. h. was Lichtstärke und Lichtfarbe betrifft. Wir können mit Aussicht auf Genauigkeit aber nur Lichtquellen gleicher Farbe miteinander vergleichen und auch weißes Licht nur mit solchem von annähernd gleicher Zusammensetzung. Die Photometervorrichtungen beruhen gewöhnlich darauf, daß man auf zwei dicht aneinander grenzenden Flächen durch Verschiebung der zu vergleichenden Lichtquellen gleiche Beleuchtungsstärke herstellt, was unser Auge mit einiger Genauigkeit feststellen kann. Alsdann verhalten sich die Lichtstärken der beiden Lichtquellen wie die Quadrate ihrer Entfernungen von den gleichbeleuchteten Flächen. Nun ist aber unser Auge für verschiedenfarbige Lichteindrücke nicht in der gleichen Weise empfindlich; während es z. B. durch gelbes Licht stark erregt wird, nimmt es violettes Licht größerer Intensität kaum wahr, auf ultraviolette Strahlen aber reagiert es gar nicht. Wir werden

daher beim Vergleich verschiedenfarbiger Lichtquellen sehr leicht von unserem Auge getäuscht. Es war daher naheliegend, daß man die elektrischen Wirkungen des Lichtes zur Photometrie zu verwenden suchte. In erster Linie kam hier die Selenzelle zur Verwendung. Nun reagiert aber das Selen je nach seiner Präparation auf die einfachen Lichtfarben sehr verschieden; ferner hat die Vorbelichtung einen wesentlichen Einfluß auf die Empfindlichkeit einer Selenzelle, indem z. B. Vorbelichtung einer Zelle mit blauem Licht deren Empfindlichkeit für rotes Licht steigert. Daher ist auch die Selenzelle von vornherein nur zur Vergleichung von einfarbigen bezw. weißen Lichtquellen geeignet. Aber auch da bieten sich für genaue Messungen noch wesentliche Schwierigkeiten wegen der bekannten Selenfehler (Trägheit, Inkonstanz u. a.).

Die Meßmethoden mit Selen lassen sich im allgemeinen in 2 Klassen einteilen; bei der einen Gruppe von Meßverfahren soll die Widerstandsänderung des Selens bei Belichtung direkt die photometrische Messung liefern, bei der andern wird die Selenzelle lediglich zum Vergleichen der zu messenden Lichtquelle mit einer Vergleichslichtquelle benutzt. Nun wissen wir aber, daß der Dunkelwiderstand einer Selenzelle nicht bloß mit der Zeit sich ändert, sondern auch von äußeren Einflüssen (Temperatur, vorhergehender Belichtung u. a.) sehr stark abhängig ist. Daher wird das Resultat einer direkten Messung durch den jeweiligen Zustand der Selenzelle wesentlich beeinflußt, so daß auf diesem Wege eine Genauigkeit, wie man sie nach dem jetzigen Stand der Lichtmeßtechnik verlangen muß, nicht erreicht werden kann. Dagegen kommt für diejenige Gruppe von Meßverfahren, bei denen die Selenzelle nur Vergleichsmittel ist, der Zellenzustand nicht in Betracht und man kann auf einfache Weise eine Genauigkeit erzielen, die sicherlich von keinem anderen Meßverfahren überboten wird.

a) Die Selenzelle als Meßmittel.

Man ermittelt experimentell die Leitfähigkeiten einer Selenzelle für die verschiedenen Lichtstärken und zeichnet (S. 100) eine Kurve, welche die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Lichtintensität darstellt. Damit ist die Zelle geeicht. Mittels dieser Kurve läßt sich dann die Stärke einer Lichtquelle aus deren Entfernung von der Selenzelle und der beobachteten Leitfähigkeit berechnen.

Genauere Resultate erhält man mit einem von Nisco (214) angegebenen Verfahren. Belichtet und verdunkelt man eine Selenzelle abwechselnd in regelmäßigen Zwischenräumen, so nehmen bekanntlich schon nach wenigen Wechseln die Leit-

fähigkeiten für Licht und Dunkel einen konstanten Wert an (S. 133), so daß dann die Differenz zwischen dem oberen und unteren Leitfähigkeitswert eine unveränderliche Größe darstellt. Da nun diese Differenz von der Beleuchtungsstärke abhängig ist, kann man aus ihrer Größe auf die Stärke der zu untersuchenden Lichtquelle schließen.

b) Die Selenzelle als Vergleichsmittel.

Die Selenzelle wird abwechslungsweise einer Lichtquelle von bekannter Stärke bezw. der zu untersuchenden Lichtquelle ausgesetzt und letztere solange verschoben, bis beide Lichtquellen die gleiche Wirkung auf die Selenzelle ausüben. Dann ist offenbar die Beleuchtungsstärke an der Zelle in beiden Fällen gleich und es verhalten sich die Lichtstärken der beiden Lichtquellen wie die Quadrate ihrer Entfernungen von der Selenzelle.

Den Wechsel der Beleuchtung haben die Konstrukteure durch die verschiedensten Anordnungen zu erreichen gesucht. Am wenigsten empfehlen sich diejenigen Vorrichtungen, bei denen die Selenzelle durch Hin- und Herbewegen oder durch Umdrehen bald in den Strahlengang der einen Lichtquelle, bald in den der anderen gebracht wird. Es sollen hier kurz drei Anordnungen angegeben werden, bei denen die Selenzelle feststeht und die Strahlen der 2 Lichtquellen abwechslungsweise auf die Selenzelle geworfen werden.

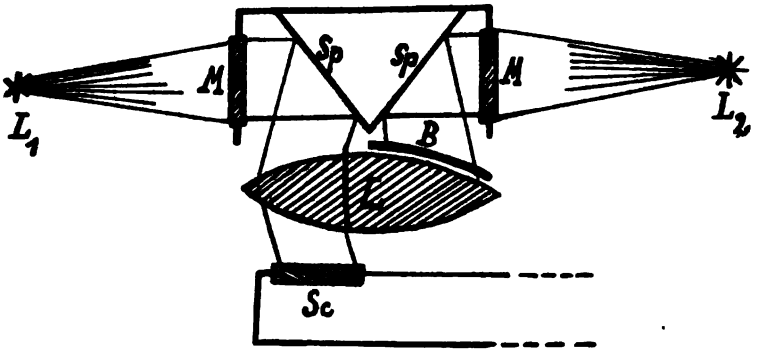


Fig. 172.

Fig. 172 zeigt uns eine Vorrichtung, bei der die Strahlen der Lichtquellen L_1 und L_2 nach ihrem Durchgang durch die Milchglasscheiben M auf die Spiegel Sp treffen und von da über die Linse L nach der Selenzelle Se gelangen. Durch die bewegliche Blende B wird erreicht, daß immer nur ein Teil des Lichtes der beiden Lichtquellen die Zelle trifft.

Jaenichen (441) verwendet bei seinem Selenphotometer zur Erreichung der abwechselnden Belichtung eine mit einem Ausschnitt versehene Trommel, die gedreht wird und dabei das Licht beider Lichtquellen abwechselnd abblendet. Das Photometer läßt sich bequem nach beiden Seiten verschieben, bis man für beide Lichtquellen denselben Galvanometerausschlag erhält.

Schließlich sei noch auf eine Anordnung hingewiesen, wie sie Timar (366, 386) benutzte. Hier wird die Selenzelle durch einen umlaufenden Spiegel abwechselnd von beiden Lichtquellen bestrahlt (Fig. 173). Die Vorrichtung hat den Nachteil, daß die Beleuchtungsstärke an der Zelle infolge der Umdrehung der Spiegelfläche beständig zwischen Null und einem Maximum schwankt. Dadurch wird der Galvanometerausschlag schwankend und die Ablesung ungenau.

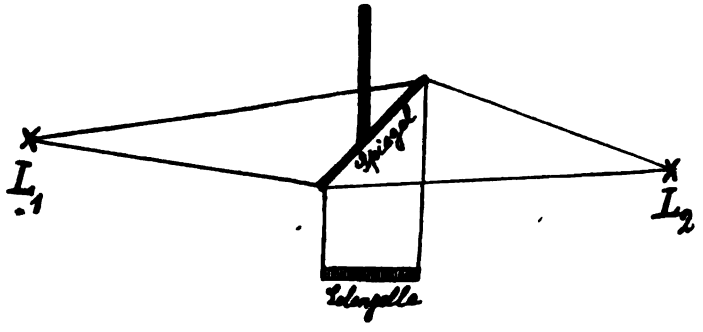


Fig. 173.

Demnach ist es von wesentlicher Bedeutung, daß die gesamte, von beiden Lichtquellen auf die Selenzelle fallende Lichtmenge stets dieselbe bleibt und auch beim Übergang von der einen zur anderen Lichtquelle sich nicht ändert. Es muß also genau in dem Augenblick, in dem die eine Lichtquelle von einem Teil der Selenoberfläche verschwindet, die andere Lichtquelle auf diese Selenfläche einzuwirken beginnen. Auf die Erfüllung dieser Forderung hat insbesondere Jaenichen bei dem oben angeführten Selenphotometer das größte Gewicht gelegt, weshalb er auch bei seinen Messungen große Genauigkeit erzielen konnte. Der Wechsel der Belichtung erfolgte bei den einzelnen Anordnungen verschieden rasch und betrug im Durchschnitt ca. 10 Sekunden.

Was die elektrische Schaltung betrifft, so empfiehlt es sich nicht, Stromquelle, Selenzelle und Galvanometer hinter einander zu schalten, da die durch die Belichtung hervorgerufenen Stromschwankungen nicht stark genug zum Ausdruck kommen, wenn der Gesamtstrom durch den Meßapparat

fließt. Verwendet man dagegen eine Schaltung, bei der das Galvanometer nur von dem durch das Licht hervorgerufenen Strom durchflossen wird, so kann die Empfindlichkeit des Galvanometers viel mehr ausgenützt und die geringste Lichtdifferenz noch festgestellt werden. In manchen Fällen wird es sich empfehlen, einen Stromkreis aus Stromquelle, Selenzelle und Transformator zu bilden und in den sekundären Stromkreis einen empfindlichen Meßapparat zu legen. Jede bei Belichtungsänderung der Selenzelle auftretende Stromschwankung ruft in dem sekundären Stromkreis einen Induktionsstrom hervor, der vom Meßinstrument angezeigt wird. Die Empfindlichkeit des Instrumentes kann beliebig ausgenützt werden. Ausführlichere Mitteilungen über Schaltungen an Selenphotometern finden sich in einem Aufsatz von Presser „Neuere Fortschritte auf dem Gebiete der Selenphotometrie" (Schweizerische Elektrotechnische Zeitschrift 1909 S. 396).

Zum Schlusse sei noch auf die sehr interessante Dissertation von Jaenichen „Lichtmessungen mit Selen" (Zeitschrift für Feinmechanik, Berlin-Nikolassee 1914) verwiesen.

Die Photometrie bei astronomischen Beobachtungen wird im folgenden Abschnitt behandelt.

Literaturzusammenstellung über Lichtmessung mit Selen.

Siemens (22)
Rolls (20)
Giltay (58)
Vidal (74)
Morize (87)
Minchin (126)
Poliakoff (143)
Nisco (214)
Monasch (231)
Wulf u. Lucas (236)
Albrecht (237)
Bumb (241)
Hoecken (245)
Ruhmer (257)
Torda (260)
Buckney u. Jones (271)
Haub (274)
Kleinberg & Co., M. Schlechter (275)
Presser (288)
Schrott (290)
Stebbins u. Brown (268)
Albrecht (269)
Presser (339)
Timar (366, 386)
Gesellschaft für elektrotechnische Industrie (376)
Uppenborn-Monasch (410)
Pfund (404)
Fournier d' Albe (419)
Jaenichen (441)
Grann (464, 465).

III. Die Selenzelle im Dienste der Astronomie.

Bei astronomischen Beobachtungen hat die Selenzelle schon wiederholt die besten Dienste geleistet. So kann sie mit gutem Erfolge zur Feststellung des Verlaufes einer Mond- und Sonnenfinsternis Verwendung finden. Stellt man nämlich die Leitfähigkeitsänderungen des Selens während einer Finsternis graphisch dar, so geben die Kurven Aufschluß über den Verlauf der Erscheinung. Der Hauptvorzug der Methode liegt darin, daß die Zeit des Eintrittes irgend eines Ereignisses auf mehr als $^1/_{100}$ Sekunde genau bestimmt werden kann. Denn die Selenzelle reagiert auf jede Lichtänderung in weniger als $^1/_{1000}$ Sek. und ein damit verbundenes Fadengalvanometer vermag eine eingetretene Stromänderung in weniger als $^1/_{100}$ Sek. anzuzeigen. Sorgt man nun dafür, daß die Ablenkung des Fadengalvanometers auf optischem Wege aufgezeichnet wird, so hat man den Eintritt des Ereignisses auf mehr als $^1/_{100}$ Sek. genau bestimmt. Daher läßt sich diese Methode z. B. sehr gut dazu verwenden, den Anfang und das Ende der Totalität bei einer Sonnenfinsternis genau festzulegen; die genaue Zeitbestimmung der Kontakte aber ist für die Ermittlung der Konstanten der Mondbahn von großer Bedeutung für die Astronomie. Gleichzeitig ist es möglich, sämtliche Protuberanzen und die schnell vorübereilenden Schatten, welche den Eintritt und das Ende der Totalität begleiten, nach Zeit, Zahl und Dauer genau zu bestimmen. Ein weiterer Vorzug der Methode liegt darin, daß sie auch bei bedecktem Himmel noch Resultate gibt, wenn alle anderen Methoden vollständig versagen.

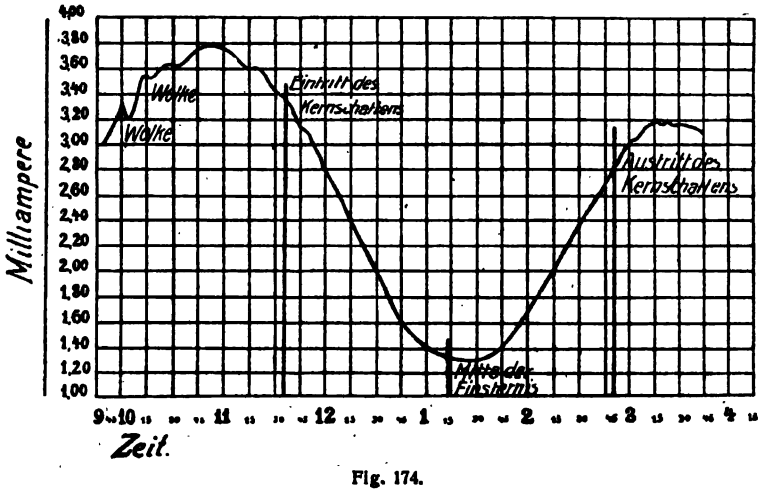


Fig. 174.

Fig. 174 veranschaulicht die Änderungen der Leitfähigkeit bezw. Stromstärke, wie sie Ruhmer (218) mittels einer Selenzelle während der fast totalen Mondfinsternis am 11. auf 12. April 1903 erhielt. In horizontaler Richtung ist die Zeit, senkrecht dazu die Änderung der Stromstärke aufgetragen. Die Veränderung der Lichtstärke während der Finsternis ist aus der Kurve nicht direkt zu entnehmen, da sich die Leitfähigkeit des Selens nicht proportional mit der Lichtstärke ändert. Der rechte Ast der Kurve erreicht nicht mehr die Höhe des linken; hier ist zweifellos die Trägheit des Selens beteiligt. Ruhmer hat offenbar die Zelle während des ganzen Versuches fortdauernd belichtet, so daß sich allmählich die Nachwirkung des Lichtes bemerkbar machen muß. Es hätte sich wohl empfohlen noch eine zweite Selenzelle aufzustellen, die nur in bestimmten Zeitintervallen und auch da immer nur wenige Sekunden dem Mondlicht ausgesetzt gewesen wäre. Diese zweite Zelle wäre dann von Trägheitserscheinungen nahezu frei gewesen und hätte sicheren Aufschluß über die Lichtstärke geben können.

Besonders interessante Versuche haben Wulf und Lucas (236) bei der totalen Sonnenfinsternis am 30. August 1905 zu Tortosa an der Ostküste von Spanien angestellt. Die Beobachtung erstreckte sich auf den ganzen Tag von 4 Uhr morgens bis $^1/_2$7 Uhr abends. Dabei war die Stellung der Selenzelle stets derart, daß die Sonnenstrahlen senkrecht auf die Zelle fielen. Die Belichtung der Zelle dauerte immer nur eine Minute, dann wurde die Stromstärke abgelesen und wieder verdunkelt. Fig. 175 enthält eine graphische Darstellung der Resultate. Die obere Kurve gibt die Leitfähigkeit des belichteten, die untere diejenige des unbelichteten Selens an. Die Leitfähigkeit nimmt mit Sonnenaufgang (ca. $^1/_2$6 Uhr) rasch zu, um dann gleichmäßig bis 12 Uhr zu steigen, wo die Finsternis beginnt. Gleich mit dem ersten äußeren Kontakt begann die Abnahme der Leitfähigkeit, die bis zur vollkommenen Totalität gleichmäßig fortdauerte. Die Ecken in dem abfallenden Kurventeil finden ihre Erklärung in dem Umstand, daß einige Wolken die Sonne verhüllten. Die vollkommene Totalität war um 1 h 18' erreicht. Die zweite Hälfte der Finsternis fiel zusammen mit einer langsamen Aufklärung des Himmels; daraus und aus der Nachwirkung der Selenzelle erklärt sich, daß der letzte Kontakt aus der Kurve nicht zu erkennen ist, dieselbe vielmehr noch etwas ansteigt. Das rapide Sinken der Leitfähigkeit nach 4 Uhr ist durch starke Wolkenbildung verursacht, während gegen 6 Uhr wieder Aufklärung des Himmels eintrat. Der Sonnenuntergang erfolgte um 6 h 23'. Aus der unteren Kurve ersieht man, daß die Zelle vor jeder folgenden Belichtung den Dunkelwert noch nicht vollkommen erreicht

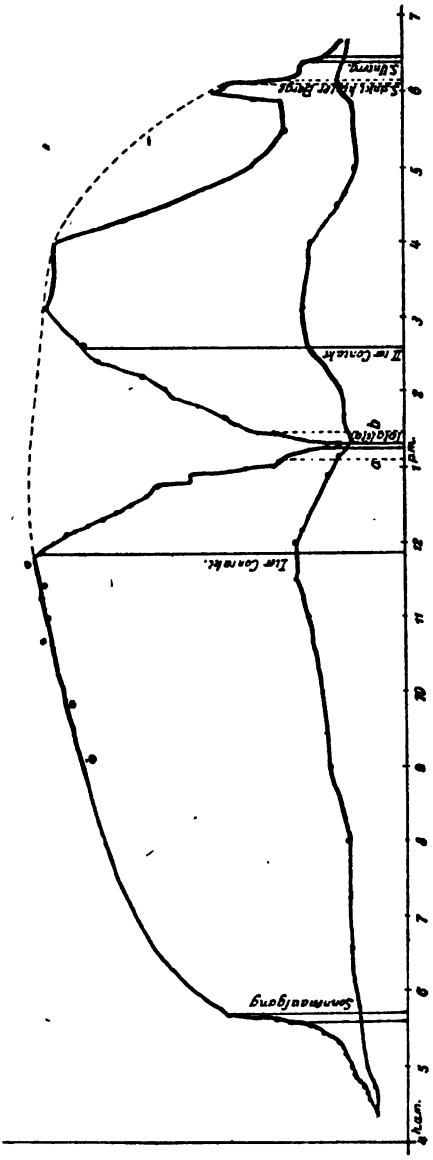

Sonnenaufgang
Tier Contakt.
Tier Contakt
Sunkt heater Berge
Sonntag.
a
b
1 p.m.
4 h.a.m.

Fig. 175.

hatte. Die gestrichelte Linie an der oberen Kurve stellt die Leitfähigkeit eines zweiten Versuches an einem klaren Tag desselben Ortes dar. Man sieht, daß die Abnahme der Lichtintensität schon um 1 Uhr einsetzt. Die Leitfähigkeitswerte für den Nachmittag dürften infolge der Trägheit des Selens ein wenig zu groß sein.

Da der Verlauf der Erscheinung in der Nähe und während der Totalität besonderes Interesse bietet, wurde während dieser Zeit die Selenzelle beständig dem Lichte ausgesetzt. Fig. 176 zeigt die beobachteten Veränderungen der Stromstärke für diesen Abschnitt. Die Kurve fällt bis zum Eintritt der Totalität fast gleichmäßig ab und verläuft während der vollkommenen Totalität nahezu horizontal, um dann wieder rasch anzusteigen. Aus der kleinen Neigung der Kurve während der Totalität ersieht man den Einfluß der Trägheit der Selenzelle, die erst allmählich das Minimum des Widerstandes annimmt. Der gestrichelte Kurventeil ist extrapoliert, da leider genau am Ende der Totalität keine Messung stattfand.

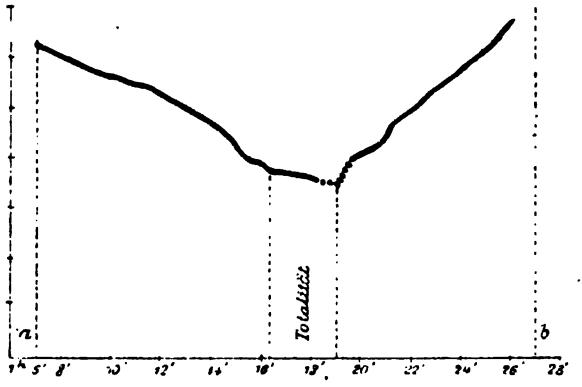


Fig. 176.

Die Anordnung, welche die genaue Zeit der Lichteinwirkung aufzuzeichnen ermöglichte, wird im folgenden Abschnitt behandelt werden.

Bei direkter Beleuchtung einer Selenzelle mit dem Lichte der Venus kann man Ströme von der Ordnung 10^{-9} Amp. erhalten. Da wir mit sehr feinen Galvanometern Ströme bis 10^{-14} Amp., also noch einen ca. 100 000 mal kleineren Strom feststellen können, so ist es nicht ausgeschlossen mittels der Selenzelle Sterne, die für das unbewaffnete Auge zu lichtschwach sind, ohne jede optische Hilfe aufzufinden. Für alle Fälle aber haben wir in der Selenzelle ein Mittel, die Lichtstärken von Sternen zu vergleichen und die Schwankungen der Lichtstärke eines Sternes festzustellen. Notwendig

ist dabei natürlich ein äußerst sorgfältiger Schutz der Selenzelle vor anderen äußeren Einflüssen. Messungen dieser Art wurden wiederholt von Fournier d'Albe (419) angestellt, während der erste Vorschlag zur Verwendung des Selens bei astronomischen Beobachtungen von Minchin (126) stammt.

IV. Zeitbestimmung auf Tausendstel einer Sekunde.

Im vorhergehenden Abschnitt wurde bereits auf die hohe Bedeutung der exakten Zeitbestimmung bei astronomischen Beobachtungen hingewiesen. Es soll nun im folgenden zuerst das Verfahren angegeben werden, das Wulf und Lucas (236) bei Beobachtung einer Sonnenfinsternis angewendet haben. Die Versuchsanordnung ist aus Fig. 177 ersichtlich. Cr ist ein hochempfindlicher Film, der gleichmäßig an einem horizontalen Spalt vorbeibewegt wird, C eine Zylinderlinse, Q ein Quarzfaden, T ein Stahlmagnet, A eine Acetylenflamme und M ein Mikroskop. Der Magnet T und der Quarzfaden Q bilden die wesentlichsten Bestandteile eines Fadengalvanometers, das in der Brücke einer Wheatstoneschen Brückenschaltung liegt. In einen der 4 Zweige der Brückenschaltung legt man eine Selenzelle und regelt die anderen Widerstände derartig, daß das Galvanometer stromlos ist, solange die Zelle unbeeinflußt bleibt. Fällt nun ein Lichtschein auf die Selen-

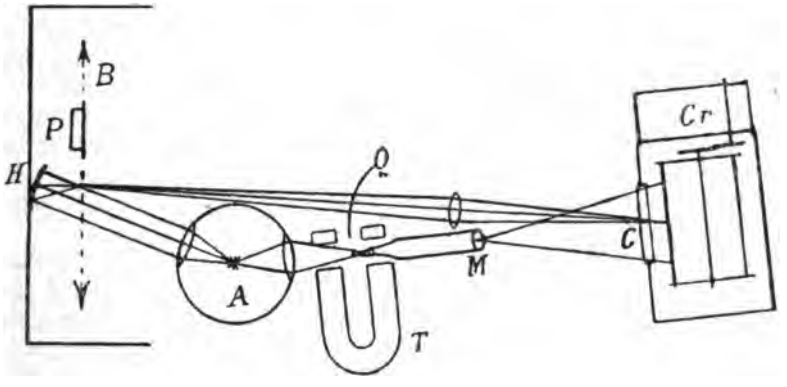


Fig. 177.

zelle, so wird der Quarzfaden abgelenkt und von dessen mittlerem Fadenstück Q mittels der Flamme A, des Mikroskops M und der Linse C ein Bild auf dem bewegten Film erzeugt, so daß die Galvanometerschwankungen bezw. die durch das

Licht hervorgerufenen Stromänderungen auf dem Film sichtbar werden. Unmittelbar vor dem Film befindet sich noch eine Millimeterskala auf Glas, durch die auf dem Film der ganzen Länge nach parallele Linien gezeichnet werden. Die Geschwindigkeit des Films läßt sich so regeln, daß die durch den Spalt belichtete Linie in einem beliebigen Bruchteil einer Sekunde wechselt.

Um die genaue Zeit, in der jede einzelne Stromänderung erfolgte, aus dem Film bezw. der Lichtkurve entnehmen zu können, befestigt man hinter der Pendelstange eines Sekundenpendels einen kleinen Hohlspiegel H. Auf der Pendelstange selbst sitzt ein ca. 4 cm langes und breites schwarzes Blech B. Das Licht der Flamme A fällt auf den Spiegel H und wird in einem Brennpunkt gesammelt. Flamme und Spiegel werden so angeordnet, daß der Brennpunkt gerade von dem kleinen Schirm B auf der Pendelstange durchschnitten wird. Dies tritt immer dann ein, wenn das Pendel seine tiefste Lage einnimmt. Von dem entstehenden Lichtkegel wird dann mittels einer weiteren Linse auf dem Film eine Linie erzeugt, die aber nach jeder Sekunde scharf abgeschnitten eine Sekunde aussetzt (Fig. 178), wenn nämlich der Schirm auf dem Pendel den Lichtkegel abblendet. Damit ist die Zeit genau aufgezeichnet, da die Mitte des dunklen Striches auf dem Film genau dem einen Umkehrpunkt des Pendels, die Mitte des hellen Zwischenraumes dem anderen Umkehrpunkt entspricht. Durchschneidet man mit der Hand einmal den Lichtkegel und notiert sich diese Zeit genau, so ermöglicht die auf dem Film entstehende Marke die genaue Bestimmung der Sekunde. Bei astronomischen Untersuchungen ist es nötig, daß das Sekundenpendel mit der astronomischen Uhr eines Observatoriums gleichen Gang hat, was auf telephonischem Weg kontrolliert werden kann.

Dieses Verfahren bietet uns die Möglichkeit, den Moment des Eintrittes eines Ereignisses auf Tausendstel Sekunden genau festzulegen. In allen Fällen, in denen eine exakte oder in sehr kurzen Zeitintervallen nötige Zeitregistrierung erforderlich ist, verspricht das Verfahren den besten Erfolg.

Die Genauigkeit, mit der die ganze Einrichtung arbeitet, ergibt sich aus folgendem interessanten Versuch. Wulf und Lucas sammelten ein von einem Heliostaten reflektiertes Bündel Sonnenlicht durch eine Linse in einem Brennpunkt von ca. 2 Millimeter Durchmesser. Von hier wurde das divergente Strahlenbündel zum Teil auf die Selenzelle, zum Teil mittels geeigneter Spiegel auf die Zylinderlinse geworfen, so daß es auf dem bewegten Film eine dunkle Linie erzeugte. Hält man bei dieser Anordnung in den Brennpunkt des Sonnenlichtes schnell einen Schirm, so bezeichnet das Ende der Lichtlinie genau jene Stelle des Films, die gerade in diesem

Augenblick exponiert war. Durch diese Bewegung wird aber auch das ganze Licht plötzlich von der Selenzelle abgehalten und das Galvanometer abgelenkt. Wenn nun der Vorgang an irgend einer Stelle, sei es in der Selenzelle, sei es im Galvanometer, eine Verzögerung erfährt, so muß die Ablenkung des Galvanometers, die man durch Projektion mittels der Azetylenflamme erhält, hinter dem Ende der Lichtlinie auf dem Film um so viel verschoben sein, als sich der Film in der Zwischenzeit voranbewegt hat. Eine Betrachtung der Fig. 178 bestätigt, daß diese Methode in hohem Grade geeignet ist, den Moment der Lichteinwirkung genau festzulegen. Denn bei der angewendeten Geschwindigkeit des Films von 12 mm pro Sekunde käme z. B. auf 0,1 Sekunde 1,2 mm Verschiebung. Daß eine solche auch nicht

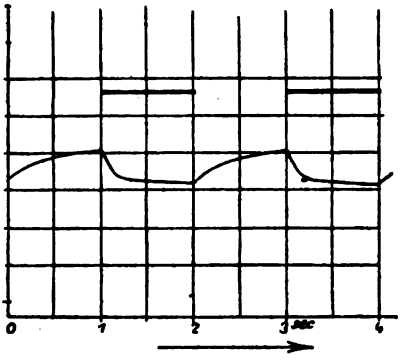


Fig. 178.

annähernd vorliegt, zeigt ein Blick auf die Figur. Die Stellen links auf der Figur sind zuerst exponiert, so daß die linken Enden der dunklen Linien die Momente bezeichnen, wo das Licht auf das Selen einzuwirken begann. Die Kurve veranschaulicht die Widerstandsänderungen der Selenzelle bei Belichtung und Verdunkelung. Man sieht auch hier wieder, was wir schon früher festgestellt haben, daß der Widerstand bei Belichtung viel rascher abnimmt als er bei Verdunkelung auf den ursprünglichen Wert zurückgeht.

Verschiedentlich wurde die Selenzelle zur Herstellung eines Sekundenkontaktes bei Pendeluhren verwendet. Die Einrichtung einer elektrischen Pendeluhr besteht im allgemeinen darin, daß das Pendel in einer bestimmten Lage einen Kontakt schließt; dadurch wird für einen Augenblick ein elektrischer Strom eingeschaltet, der durch Erregung eines Elektromagnets eine abstoßende oder anziehende Wirkung auf das Pendel ausübt und dadurch die Pendelschwin-

gungen unterhält. Da nun beim Anschluß von Nebenuhren durch die Schließung des Kontaktes der Gang der Hauptuhr (Normaluhr) mehr oder minder beeinflußt wird, suchte Courvoisier (226) zur Erreichung idealer, von äußeren Störungen freier Pendelschwingungen einen rein optischen Sekundenkontakt herzustellen. Zu diesem Zwecke brachte er tief unten am Pendel der Uhr parallel zur Schwingungsebene einen kleinen Spiegel an, der im Moment des Pendeldurchganges durch die Ruhelage das Licht einer Lampe gegen eine Selenzelle reflektierte, die ihrerseits mittels eines Relais die gewünschten Apparate betätigte.

Fig. 179 veranschaulicht die Schaltung, wie sie Schlesser (318) zu seiner elektrischen Pendeluhr benützte. Die Spule Sp enthält einen Eisenkern, der bei Stromdurchgang auf eine (in der Figur nicht gezeichnete) Vorrichtung einwirkt und dadurch die Pendelschwingungen unterhält. Die Pendelscheibe enthält 2 Öffnungen O_1 O_2, die um den Ausschlagswinkel des Pendels von einander abstehen; bei ihren Schwingungen, die die Pendelscheibe zwischen 2 gegenüberliegenden Öffnungen vollführt, läßt sie in ihrer äußersten Links- oder Rechtsstellung durch O_1 bezw. O_2 Licht auf eine Selenzelle S_1 durchfallen und zwar wird das durchgehende Licht durch eine Linse auf die im Dunkeln liegende Zelle konzentriert. Dadurch wird das Relais R_1 betätigt, welches den Strom für die Antriebsspule Sp sowie für die Nebenuhren schließt. Über der Zelle S_1 befindet sich eine zweite Selenzelle S_2, die nicht im Dunkelraum liegt und mit dem Relais R_2 in Verbindung steht. Sobald nämlich das natürliche Licht nachläßt, steigt der Widerstand von S_2 an, so daß der Anker des Relais R_2 abfällt und durch Kontaktschluß die Lampe G sich entzündet. Ferner ist noch eine Vorrichtung angebracht, die beim Erlöschen von G automatisch eine 2. Lampe entzündet und außerdem ein Signal gibt zum Zeichen, daß die Lampe G ersetzt werden muß. Wir sehen also in diesem Apparat, der tatsächlich ausgeführt wurde und sich im Betrieb bewährte, mehrere Selenapparate vereinigt.

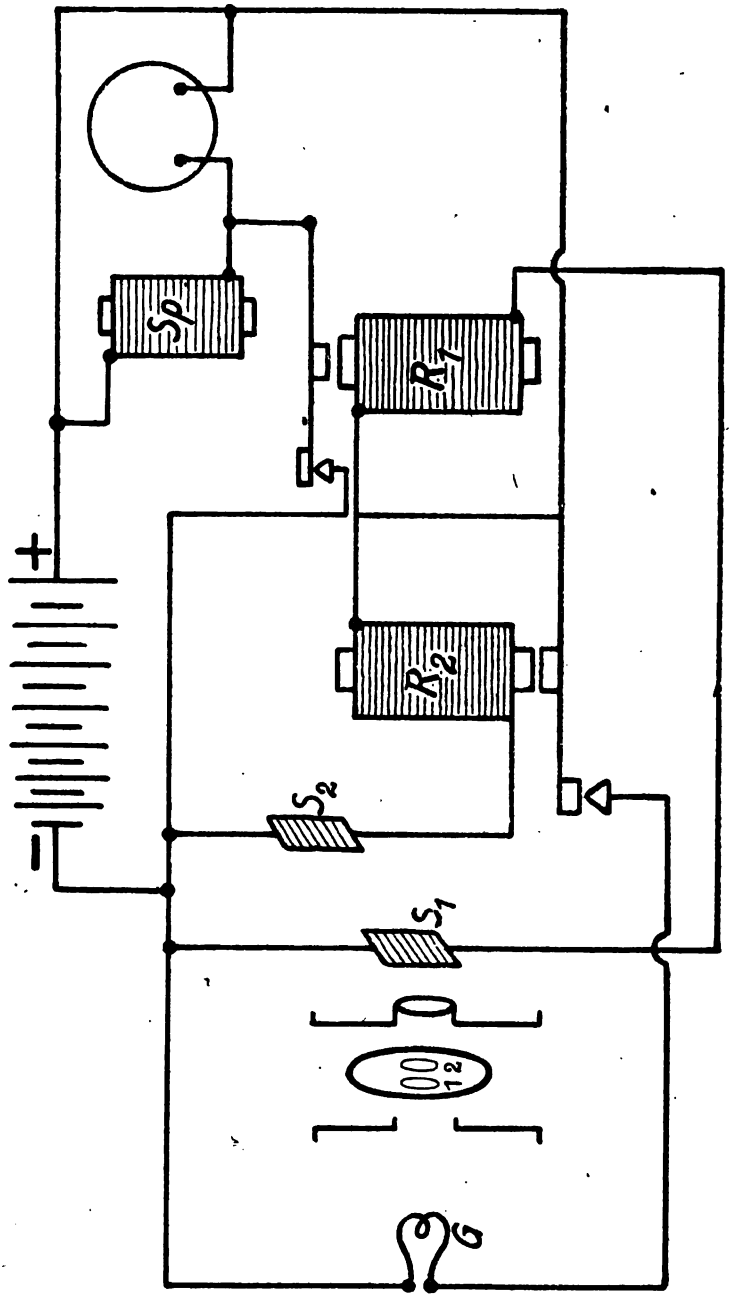


Fig. 179.

V. Optische Zählvorrichtung; Ersatz der Briefmarke.

Wir haben im vorhergehenden Kapitel die Verwendbarkeit der Selenzelle zur genauen Zeitbestimmung bezw. zur Zählung von Sekunden beschrieben, es soll nun ihre Ausnützung zum Zählen von Gegenständen und Materialien der verschiedensten Art behandelt werden. Die große Bedeutung einer optischen Zählvorrichtung ist ohne weiteres klar; hat doch eine Zählung auf optischem Wege vor jeder anderen den großen Vorzug, daß sie ohne Berührung des zu zählenden Gegenstandes und ohne jede Reibung vor sich geht.

Vorerst will ich an einige Vorrichtungen erinnern, die bereits auf die Möglichkeit des Zählens mittels einer Selenzelle hinweisen. Belichtet man durch die Öffnungen der in rascher Umdrehung befindlichen Scheibe des photophonischen Rades (S. 75) eine Selenzelle, die mit einem Telephon und einer Stromquelle verbunden ist, so entstehen in der intermittierend belichteten Zelle Stromschwankungen und man hört in dem Telephon einen Ton, dessen Höhe von der Zahl der Öffnungen abhängt, die pro Sekunde an der Zelle vorbeigehen. Umgekehrt kann man aus der Tonhöhe auf die Anzahl der Belichtungen und auf die Zahl der Umdrehungen des Rades pro Sekunde schließen. Ferner verweise ich auf einen eigentlich für Blinde (S. 308) bestimmten Apparat, der im wesentlichen aus einer Selenzelle, einer Stromquelle, einem Telephon und einem Unterbrecher besteht. Sämtliche Apparate liegen in einem Stromkreis, der durch den Unterbrecher ca. 10 mal in der Sekunde unterbrochen wird. Solange die Selenzelle gegen eine konstante Lichtquelle gerichtet ist, hört man in dem Telephon einen Ton von bestimmter Höhe. Gleitet aber ein Körper vor der Zelle vorbei, so daß diese beschattet wird, so tritt eine momentane Tonänderung ein. Die Anzahl der Tonänderungen gibt die Zahl der vorübergegangenen Körper an.

Ich will nun eine von mir (497) ersonnene Zählmaschine beschreiben, deren Einrichtung aus Fig. 180 zu ersehen ist. Die Erfindung besteht im wesentlichen darin, daß man die zu zählenden Körper zwischen einer Lichtquelle und einer Selenzelle hindurchgleiten und die dabei entstehenden Stromstöße auf ein Zählwerk einwirken läßt. Beim Hindurchgleiten der Körper zwischen Lichtquelle und Zelle wird letztere abwechselnd belichtet und beschattet. Man kann nun die Einrichtung so treffen, daß man entweder die Stromschwächung bei einer Beschattung oder die Stromver-

stärkung bei Lichtzutritt zur Arbeitsleistung bezw. Zählung ausnützt.

In der Zeichnung bedeutet $Z_1 Z_2$ ein Selenzellenpaar, W_1 und W_2 sind feste Widerstände, K ist ein Kurbelwiderstand. In der Brücke liegt ein Umschalter U, der gestattet, den Brückenstrom entweder über das Relais $R_1 R_2$ oder über das strommessende Kontrollinstrument J und den Zusatzwiderstand W zu leiten. Die Summe der Widerstände von J und W ist gleich demjenigen des Relais. Während des Betriebes wird der Strom über das Relais geleitet.

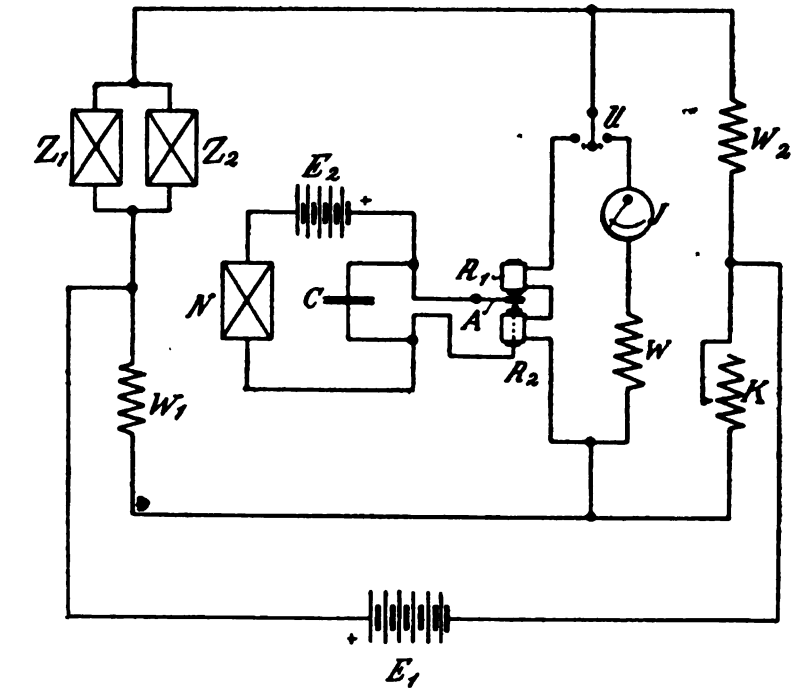


Fig. 180.

Durch entsprechende Einstellung des Kurbelwiderstandes K erreicht man es leicht, daß das Relais $R_1 R_2$ stromlos ist, solange das Licht einer konstanten Lichtquelle direkt auf das Zellenpaar $Z_1 Z_2$ fällt. Gleitet nun zwischen Lichtquelle und Zellensystem ein Körper hindurch, so geht ein Strom durch das Relais. Dieses schließt mittels der Zunge A einen zweiten Stromkreis, der aus einer Stromquelle E_2 und dem Zählwerk N besteht, und betätigt dadurch das Zählwerk. $R_1 R_2 A$ ist ein polarisiertes Relais bekannter Art (S. 229). Die Spulen R_1 und R_2 sitzen auf 2 gleichnamigen Polstücken,

zwischen denen die mit dem entgegengesetzten Pol in Verbindung stehende Zunge A spielt. In den Polstücken von R_1 und R_2 befindet sich isoliert je ein durch Schrauben verstellbarer Stift. Der im Polstück R_2 befindliche Stift ist mit dem Zählwerk N leitend verbunden. Geht kein Strom durch das Relais, so steht die Zunge A an dem Stift von R_1 an, was durch eine leichte Feder oder sonstige Mittel leicht erreicht wird. Geht aber ein Strom durch die Brücke, so wird A vom Pole R_2 angezogen, berührt den Stift von R_2 und schließt den 2. Stromkreis. Ist der an dem Zellensystem vorbeigleitende Körper so weit vorgerückt, daß das Selen wieder Licht erhält, so wird die Brücke mit dem Relais wieder stromlos und der 2. Stromkreis unterbrochen. Das Dazwischentreten des nächsten Körpers zwischen Lichtquelle und Zellensystem betätigt wieder das Relais und somit das Zählwerk usw. Um die Funkenbildung bei A nach Möglichkeit herabzudrücken ist noch ein Kondensator C angebracht.

Durch Drehen der Kurbel K kann man es auch leicht erreichen, daß das Relais stromlos ist, wenn das Zellensystem im Dunkeln liegt. Es wird dann durch die zwischen zwei aufeinander folgenden Körpern befindliche Öffnung das Selenzellensystem belichtet und dadurch das Relais bezw. das Zählwerk betätigt. Es ist nur die Anbringung eines Umschalters bei $R_1 R_2$ nötig.

Die Anwendung eines Zellensystems an Stelle einer Einzelzelle hat den Wert, daß der Effekt wesentlich verstärkt und der Strom möglichst konstant gehalten wird. Gerade letzteres ist von ganz besonderer Bedeutung. Diesem Umstand trägt auch die Anbringung des Kontrollinstrumentes J Rechnung. Man schaltet vor Inbetriebnahme des Apparates mittels des Umschalters U das Kontrollinstrument ein. Ein Blick auf dieses vergewissert, ob der Apparat richtig geht. Steht das Kontrollinstrument nicht auf Null, so genügt ein Druck auf K zur Regulierung des Brückenstromes. Während also das Zellensystem $Z_1 Z_2$ selbsttätig ausgleichend wirkt, gestattet das Kurbelinstrument K durch eine kleine Drehung jederzeit die genaueste Regulierung, falls die Kontrolle mit J die Notwendigkeit dazu ergeben sollte. Diese Vereinigung von Zellensystem, Regulierwiderstand und Kontrollinstrument liefert einen betriebssicheren Apparat.

Selbstverständlich sind nicht zwei verschiedene Stromquellen E_1 und E_2 nötig, es kann der zum Betrieb des ganzen Zählapparates notwendige Strom durch entsprechende Regulieranschlüsse einer einzigen Leitung entnommen werden.

Da die Lichtstärke bei diesem Apparat beliebig groß gemacht werden kann, stehen verhältnismäßig kräftige Ströme zur Betätigung des Relais zur Verfügung. Durch die Licht-

nachwirkung wird sich der Relaisstrom bei längerem Betrieb zwar etwas verschieben. Da aber die Trägheit des Selens bekanntlich schon nach wenigen Belichtungen einen konstanten Wert annimmt, so ließe sich diesem Umstand dadurch Rechnung tragen, daß man von Anfang an mittels des Regulierwiderstandes den Brückenstrom derartig regelt, daß die Brücke während des Betriebes tatsächlich nach jeder Belichtung bezw. Beschattung stromlos würde. Es ist dies aber durchaus nicht nötig, da der durch die Trägheit hervorgerufene Brückenstrom gegenüber dem (zur Betätigung des Zählwerkes verwendeten) Arbeitsstrom sehr gering ist und, da er zur Betätigung des Relais bei weitem nicht ausreicht, keinerlei Störung verursachen kann.

Je nach der Art der zu zählenden Gegenstände wird die Vorrichtung, mittels der die einzelnen Körper vor dem Zellensystem vorbeigeführt werden, wohl eine etwas verschiedene Form erhalten müssen. Besonders interessieren dürfte der sicherlich sehr praktische und leicht ausführbare Vorschlag, die Maschine zum Zählen von Briefen zu verwenden. Es soll im folgenden gezeigt werden, daß durch die sehr leicht durchführbare Vereinigung der beschriebenen Zählmaschine mit der bei der K. Bayerischen Post eingeführten Frankostempelmaschine die Briefmarke für Massenablieferungen entbehrlich wird und daß der Apparat bei absoluter Betriebssicherheit eine genaue Kontrolle der Zahl der Briefe ermöglicht.

Die bayerische Postverwaltung hat am 1. Februar 1910 versuchsweise für Massenablieferung mit der Beförderung von Postsendungen ohne Briefmarken begonnen und zwar zunächst in München und Nürnberg. Die mit diesem Verfahren gemachten guten Erfahrungen veranlaßten die bayer. Postverwaltung, alsbald auch in Augsburg, Bamberg, Ludwigshafen, Regensburg und Würzburg derartige Maschinen aufzustellen. Die Einrichtung der Frankostempelmaschine hat nur den einen wesentlichen Nachteil, daß die Feststellung der Stückzahl der Sendungen auf Grund von Gewichtsermittlungen erfolgen muß. Daher dürfen die zu einer Auflieferung gehörigen Sendungen nur eine Gattung, also nur Briefe oder Karten oder Drucksachen oder Geschäftspapiere umfassen und müssen bezüglich Inhalt und Verpackung übereinstimmen, damit sie alle das gleiche Gewicht haben. Die Ermittlung der Stückzahl erfolgt in der Weise, daß das Gewicht von z. B. 20 Einzelsendungen festgestellt, das Gesamtgewicht der Sendung durch jene Gewichtszahl dividiert und das gefundene Resultat in unserem Falle mit 20 multipliziert wird. Bei einer derartigen Feststellung der Stückzahl sind natürlich Täuschungen nicht ausgeschlossen. Es wäre denkbar, daß die Ablieferung nicht durchweg aus gleichschweren Stücken be-

stände; wären dann z. B. die 20 Einzelsendungen, deren Gewicht festgestellt wird, schwerer als ein Teil der übrigen Sendung, so würde die Wägung eine zu niedrige Stückzahl ergeben und die Postverwaltung würde geschädigt. Diese Tatsache dürfte wohl die Reichspost seiner Zeit zu ihrem großen Widerstand gegen die Einführung der Frankostempelmaschine veranlaßt haben. Es kann hier auf eine genaue Beschreibung der Frankiermaschine verzichtet werden, da sich deren Einrichtung bei Vereinigung mit der oben beschriebenen Zählmaschine wesentlich vereinfacht. Nur das sei noch erwähnt, daß der erste Vorschlag zum Bau von Frankostempelmaschinen offenbar von dem bayerischen Betriebsingenieur Joseph Baumann ausging, der auch mehrere Patente auf derartige Apparate besitzt.

Welcher Beliebtheit sich die Barfrankierung erfreute, ergibt sich daraus, daß bereits im ersten Jahre beim Postamt München mehr als 10 Millionen, im Jahre 1913 mehr als 15 Millionen Postsendungen den Frankostempel erhielten. Es sei hier auf eine Schilderung des Vizepostdirektors Maaß im Berliner „Tag" vom 25. April 1912 hingewiesen, in der es u. a. heißt:

„Allein bei dem Postamt 2 München sind in den ersten Jahren seit Einführung der Neuerung mehr als 10 Millionen Sendungen eingeliefert worden, für die 371 500 Mk. an Franko bar entrichtet worden sind. Wie durch Nachfrage in mehreren großen Betrieben festgestellt ist, in denen dauernd bestimmtes Personal nur mit der Frankierung von Postsendungen beschäftigt, also darin geübt ist, nimmt das Bekleben von 1000 Sendungen mit Marken eine Kraft 1,5 Stunden in Anspruch; es können also von einer Person an einem Tage zu neun Arbeitsstunden 6000 Sendungen frankiert werden, oder in einem Jahre zu 300 Arbeitstagen 1,8 Millionen. Um die in einem Jahre beim Postamt 2 in München zur Barfrankierung eingelieferten Sendungen mit Marken zu bekleben, hätten demnach 6 Kräfte ein Jahr hindurch beschäftigt sein müssen!"

Die Vorteile der Barfrankierung würden aber nicht nur dem Publikum zugute kommen, sondern auch der Postverwaltung, wie folgende Berechnung zeigt, Zur Frankierung der zehn Millionen Sendungen hätten 100 000 Bogen Freimarken verwendet werden müssen. Nimmt man die gesamten Herstellungskosten eines Bogens Freimarken nur mit 3 Pfennig an, ein zweifellos nicht zu hoch gegriffener Betrag, so hätte die Herstellung dieser 100 000 Bogen 3000 Mark gekostet. Bei Einführung der Barfrankierung würde es sich aber z. B. in Berlin etwa um die dreifache Zahl von Sendungen handeln und um eine entsprechende Ersparnis, obwohl noch gar nicht die Zeit und Arbeit berechnet ist, die dadurch erspart wird,

daß die Versendung der Postwertzeichen, die Verwaltung und der Verkauf an das Publikum erheblich eingeschränkt würde.

Schließlich sei noch auf die Broschüre von Alfred Manes „Ersatz der Briefmarken durch Frankiermaschinen", herausgegeben vom Hansabund für Gewerbe, Handel und Industrie, Berlin 1914, hingewiesen, in der die wesentlichen Vorzüge dieser postalischen Reform eingehend gewürdigt werden.

Da die Verbindung der Zählmaschine mit der Frankostempelmaschine den wesentlichsten Fehler der letztern beseitigt, wäre es im Interesse aller Postverwaltungen gelegen, wenn sie diesem einfachen Projekte baldigst näher treten wollten. Die Frankostempelmaschine mit automatischem Zählwerk würde ungefähr folgende Einrichtung erhalten:

Die Postsendungen werden einzeln hinter einander in mehr oder minder großen Abständen auf Bändern befördert und passieren sowohl die Stempelmaschine, wo sie den üblichen Aufdruck (Fig. 181) erhalten, als auch die Zählmaschine d. h. den Raum zwischen Zellensystem und Lichtquelle. Die Reihenfolge, in der die 2 Einrichtungen durchlaufen werden, kann beliebig sein; es können aber auch beide Einrichtungen in einander liegen und so miteinander verbunden sein, daß beide nur gleichzeitig wirken können.

Muster der bayerischen Frankostempel-Abdrücke.

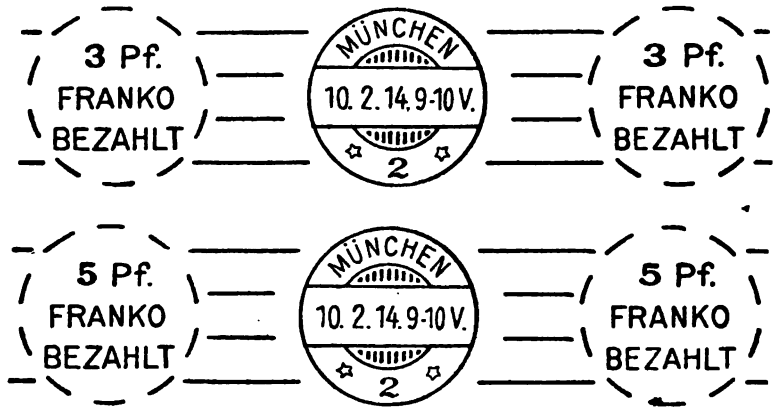


Fig. 181.

Versuche mit der Zählmaschine führten zu einem ausgezeichneten Resultat; es gelang in der Sekunde etwa 16 und in der Minute annähernd 1000 Gegenstände zu zählen. So dürfte denn die Frankostempelmaschine, die mit der opti-

schen Zählvorrichtung ausgerüstet ist, den Postverwaltungen wesentliche Vorteile und eine Vereinfachung des Betriebes bringen.

VI. Die Selenzelle im Dienste der Photographie.

Bekanntlich bereitet die Abschätzung der Belichtungszeit beim Photographieren dem Anfänger große Schwierigkeiten, da die Belichtungsdauer mit den Lichtverhältnissen wechselt. Die anfänglichen Mißerfolge bei photographischen Versuchen sind wohl größtenteils auf die unrichtige Bemessung der Belichtungszeit zurückzuführen. Man suchte daher nach einer Vorrichtung, die selbsttätig die Belichtung regelt und dem Photographen die Arbeit bedeutend erleichtert. Natürlich sollte die Selenzelle diese Aufgabe lösen.

Derartige Versuche hat zuerst Poliakoff (143) angestellt mit Hilfe der in Fig. 182 abgebildeten Anordnung. S ist ein Schieber, P die photographische Platte, Z die Selenzelle. Öffnet man den Schieber, so wird die lichtempfindliche Schicht allmählich geschwärzt, während gleichzeitig die dahinter befindliche Selenzelle immer weniger Licht erhält; dadurch nimmt der durch die Zelle gehende Strom der Batterie B allmählich ab und der Elektromagnet E läßt einen Anker fallen, durch den der Objektivverschluß betätigt wird.

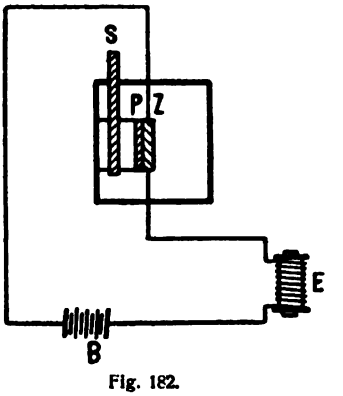


Fig. 182.

Hoecken (245) suchte das Problem in der Weise zu lösen, daß er vor der Selenzelle ein Objektiv anbrachte, das auf die Zelle das gleiche Bild wirft wie auf die photographische Platte.

Es soll nicht verschwiegen werden, daß eine wirklich brauchbare Einrichtung dieser Art, ein selbsttätiger Objektivverschluß, zur Zeit noch nicht existiert. Was den Vorschlag

von Hoecken betrifft, so müßte man eine harte Selenzelle benützen, deren Leitfähigkeit während der Belichtung noch stark ansteigt. Wir haben oben (S. 104) gesehen, daß bei Zellen dieser Art wenigstens innerhalb gewisser Grenzen die Größe der Lichtwirkung von dem Produkte aus Lichtintensität und Belichtungsdauer abhängt und daß es insbesondere gleichgültig ist, ob wir zur Erreichung eines bestimmten Effektes schwaches Licht längere Zeit oder stärkeres Licht entsprechend kürzere Zeit einwirken lassen. Es ist allerdings fraglich, ob dieses Gesetz auch für eine Belichtungsdauer von nur wenigen Sekunden Gültigkeit hat. Angenommen aber die Selenzelle genügte dieser Bedingung, so käme als weitere Forderung eine äußerst exakte Einstellung des Relais hinzu, eine Forderung, die von der Selenzelle infolge ihrer Inkonstanz und hohen Empfindlichkeit für äußere Einflüsse wohl kaum erfüllt werden kann.

VII. Die Messung der Röntgenstrahlen.

Die Bedeutung der Röntgenstrahlen für die Medizin ist allgemein bekannt. Die Röntgenstrahlen haben sich nicht bloß für die Diagnose, zur Auffindung von Fremdkörpern z. B. Nadeln und Splittern im Körper sowie zur Untersuchung der inneren Organe sehr wertvoll erwiesen, sondern auch bei der Bekämpfung und Heilung von Krankheiten herrliche Dienste geleistet. Da jedoch diese Strahlung für den menschlichen Körper durchaus nicht ungefährlich ist, bedarf selbst der Sachkundige eines zuverlässigen Meßinstrumentes zur Kontrolle der Röntgenröhre. Die Messung der Röntgenstrahlung muß eine möglichst genaue Beurteilung des Energiequantums, das von dem zu beeinflussenden Gebilde absorbiert wird, ermöglichen, damit man einen gewünschten biologischen Effekt jeder Zeit wieder reproduzieren kann. Dabei ist es nötig, nicht bloß quantitative Messungen an Röntgenstrahlen, sondern auch solche qualitativer Art vorzunehmen; nicht bloß die Strahlenmenge, auch der Charakter des von der Röntgenröhre ausgehenden Strahlengemisches muß möglichst genau bestimmt werden.

Es ist nicht möglich, relative Messungen an Röntgenstrahlen vorzunehmen unter Anwendung von Vergleichslichtquellen wie bei der Photometrie des gewöhnlichen Lichtes, weil solche Vergleichslichtquellen für Röntgenstrahlen nicht existieren. Die Vergleichslichtquelle müßte doch wohl wieder eine Röntgenröhre sein; es gelingt aber nicht, eine Normalröhre herzustellen, deren Zustand sich nicht ändert und deren Strahlung von Versuch zu Versuch konstant bleibt. Da die

Leitfähigkeitsänderungen des Selens, wie sie durch Röntgenstrahlen hervorgerufen werden, einen ähnlichen Verlauf haben als bei Bestrahlung mit gewöhnlichem Licht, war es naheliegend, die Selenzelle auch zur Messung der Energie von Röntgenstrahlen zu benützen.

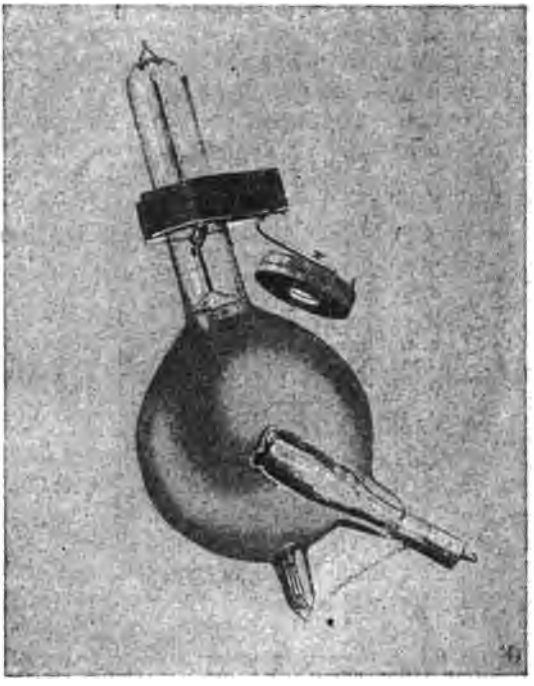


Fig. 183.

Ein einfaches Röntgenphotometer, wie man es früher benützte, ist in Fig. 183 abgebildet; es besteht aus einer Röntgenröhre, an der seitlich eine Selenzelle befestigt ist; letztere wird mit einer Stromquelle und einem Meßapparat verbunden. Diese Instrumente haben den Anforderungen in keiner Weise entsprochen; erst Fürstenau ist es durch Herstellung einer besonderen Selenzellentype in Verbindung mit einer geeigneten Apparatur gelungen, weitgehende Ansprüche zu befriedigen.

Fürstenau (440, 463) hat richtig erkannt, daß die Grundlage für die Konstruktion eines Röntgenstrahlmeßapparates unbedingt die Schaffung eines eigenen von Trägheits- und Ermüdungserscheinungen möglichst freien Röntgenstrahlzellentypes ist. Die Leitfähigkeit einer Selenzelle steigt gewöhnlich bei Bestrahlung rasch an, um nachher trotz gleich-

bleibender Lichtstärke noch weiter zu steigen oder wieder abzunehmen, wie wir es früher (S. 72) gesehen haben. Erst nach längerer Zeit nähert sich die Leitfähigkeit während der Bestrahlung asymptotisch einem annähernd konstanten Endwert; die Zeit, die bis zur Einstellung in diesen Gleichgewichtszustand vergeht, ist je nach der Lichtintensität sehr verschieden. Mit einer derartigen Zelle lassen sich natürlich Röntgenstrahlmessungen nur in der Weise vornehmen, daß man mit der Ablesung wartet, bis die Zelle einen möglichst konstanten Wert angenommen hat. Dies kann 15 bis 20 Minuten Zeit in Anspruch nehmen. Da aber nach einer so langen Bestrahlung die Zelle nur sehr langsam ihre frühere Leitfähigkeit wieder annimmt, könnte eine zweite Messung mit dem gleichen Instrument wohl erst am nächsten Tage wieder vorgenommen werden. Fürstenau ist es gelungen, eine für Röntgenstrahlen besonders empfindliche Selenzelle herzustellen, deren Leitfähigkeit bei Bestrahlung fast momentan auf einen der Strahlenintensität entsprechenden Wert ansteigt und diesen Wert einige Zeit hindurch beibehält, um dann ganz langsam abzufallen (Fig. 141). Da man eine Ablesung am Instrument in wenigen Sekunden machen kann, so wird man stets eine fehlerlose Messung erhalten, wenn man dieselbe gleich nach Beginn der Bestrahlung vornimmt. Wie wir oben (S. 184) gesehen haben, dauert die fehlerfreie Ablesezeit um so länger, je kleiner die Intensität der Strahlung ist. Da die Zelle nur einige Sekunden der Röntgenstrahlung ausgesetzt wird, erholt sie sich rasch und kann daher in kurzen Zwischenräumen zu Messungen benutzt werden.

Abb. 184 bringt die Außenansicht des Intensimeters von Fürstenau. Es besteht aus einem Zeigerinstrument, das nebst einer Wheatstoneschen Brückenanordnung in dem großen Kasten sich befindet, und einer Selenzelle, die durch eine lange Leitungsschnur mit dem Zeigerinstrument in Verbindung steht und in der rechts gezeichneten Auffangedose untergebracht ist. Die Schaltung ist aus Fig. 185 zu ersehen. A, B, C sind drei Widerstände, S die Selenzelle und E die Trockenbatterie, während das Galvanometer D in der Brücke liegt. Solange die Selenzelle bezw. die Auffangedose nicht der Röntgenstrahlung ausgesetzt ist, bleibt die Brücke stromlos und der Galvanometerzeiger steht auf Null. Bei der Messung wird die Auffangedose in den Strahlengang gelegt und zwar in der gleichen Entfernung vom Fokus der Röntgenröhre wie das Objekt, das man nachher bestrahlen will. Schaltet man die Röhre ein, so wird der Widerstand der Selenzelle verringert und der Galvanometerzeiger schlägt aus.

Das Instrument besitzt eine besondere Vorrichtung zur Konstanthaltung der Batteriespannung, da mit dem Nach-

Fig. 184.

lassen der Spannung ein Rückgang des Galvanometerzeigers verbunden wäre. Zu diesem Zwecke wird nicht die volle Batteriespannung von 4,7 Volt angelegt, sondern unter Zwischenschaltung eines variablen Widerstandes nur eine Spannung von 3,2 Volt benützt. Aus Abbildung 184 ersieht man, daß ein Schalter in drei Stellungen „Ein", „Aus" und „Prüfen" gebracht werden kann. Stellt man den Schalter auf „Ein" oder „Aus", so wird der Batteriestrom ein- oder ausgeschaltet.

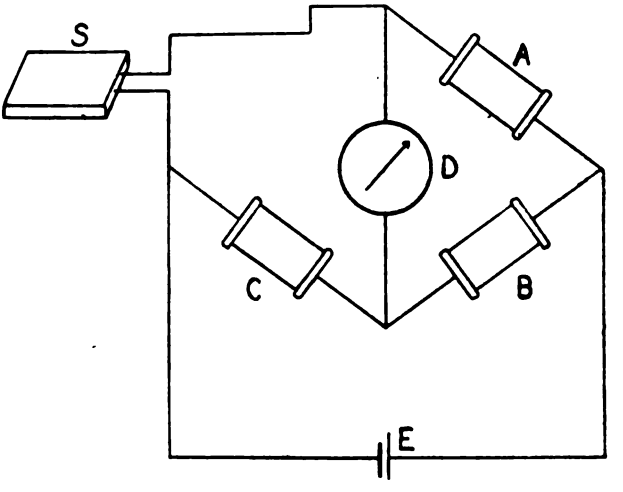


Fig. 185.

Gibt man dem Schalter aber die Stellung „Prüfen", so stellt sich der Galvanometerzeiger auf den roten Strich P der Skala ein, wenn die Spannung die richtige ist. Deckt sich der Zeiger nicht mit dem Prüfstrich, so kann man ihn durch Drehen des Regulierknopfes bezw. durch Regulierung des variablen Widerstandes leicht in diese Stellung bringen, wodurch die Spannung den vorgeschriebenen Wert annimmt. Durch Umschalten auf die Stellung „Prüfen" wird nämlich statt der Selenzelle ein bestimmter Widerstand eingeschaltet, so daß an den beiden Verzweigungspunkten, mit denen das Galvanometer in Verbindung ist, eine der Batteriespannung proportionale Potentialdifferenz entsteht. Ihre Größe wird durch den Galvanometerausschlag angezeigt. Bringt man nun durch Drehung am Regulierknopf den Galvanometerausschlag immer auf die gleiche Größe, so sorgt man dadurch zugleich für eine konstante Batteriespannung.

Die Messung mit dem Intensimeter von Fürstenau vollzieht sich also in folgender Weise. Man bringt den Schalter in die Stellung „Prüfen" und führt den Galvanometerzeiger, falls dies nötig sein sollte, durch Drehen am Regulierknopf auf den roten Prüfstrich P. Dann gibt man dem Hebel die Stellung „Ein", bringt die Auffangedose in die gleiche Entfernung vom Fokus der Röntgenröhre, in der nachher die Bestrahlung des Körpers vorgenommen werden soll, schaltet die Röntgenröhre ein und liest ab. Während der Messung steht der das Galvanometer enthaltende Kasten abseits hinter einer Schutzwand und ist durch eine Leitung mit der Erde verbunden, damit eine statische Aufladung des Instrumentes vermieden wird.

Nun unterscheiden sich die Röntgenstrahlungen bekanntlich nicht bloß durch die Strahlenmenge, sondern auch durch die Strahlenhärte d. h. ihr Durchdringungsvermögen. Es kann eine Röhre eine große Menge weicher Strahlen aussenden, die schon durch eine sehr dünne Metallschicht vollständig absorbiert werden, während eine andere Röhre eine geringere Menge von Strahlen liefert, die sehr dicke Metallschichten durchsetzen. Aber nicht bloß in verschiedenen Röhren unterscheiden sich die Strahlen quantitativ und qualitativ sehr stark, auch in ein und derselben Röhre besteht die Strahlung niemals aus lauter gleichartigen (homogenen) Strahlen; jede Röntgenstrahlung ist vielmehr ein Gemisch aus Strahlen verschiedener Härte. Daher muß bei der Röntgenstrahlmessung außer der Strahlenmenge auch noch die Strahlenhärte in Betracht gezogen werden; es muß, wenn nicht die gesamte auf die Flächeneinheit auftreffende Lichtenergie bestimmt werden kann, eine quantitative und qualitative Messung erfolgen. Es liegt die Annahme nahe, daß die Selenzelle mit

ihrer dünnen Schicht nicht die gesamte einfallende Lichtmenge anzeigt, sondern immer nur den mit der Härte wechselnden und ohne Härtemessung unbekannten Bruchteil des auffallenden Lichtes, den sie absorbiert. Wir wollen nun folgende Festsetzungen machen:

Die Intensität der Röntgenstrahlung ist die Strahlungsenergie, die in der Zeiteinheit auf die Flächeneinheit auftrifft.

Die Flächenenergie ist gleich dem Produkt aus Intensität und Bestrahlungsdauer.

Die Dosis ist gleich derjenigen Energiemenge, die in einem Körperelement absorbiert wird, dividiert durch das Volumen dieses Elementes.

Es entsteht nun die Frage: Was kann man mit der Selenzelle bezw. dem Intensimeter von Fürstenau messen? Die Erörterungen über diese in den letzten Jahren viel behandelte Frage sind noch nicht abgeschlossen. Es sollen hier die verschiedenen Anschauungen dem wesentlichen Inhalte nach wiedergegeben werden.

Grann (465) sagt darüber: „Wohl der größte Mangel der Dosierungsinstrumente besteht darin, daß sie nicht die ganze einstrahlende Lichtmenge absorbieren und anzeigen, sondern bloß einen Teil, während ein nicht absorbierter Teil den Meßkörper durchdringt und ungemessen bleibt. Der Nachteil wäre klein, wenn von jeder Härte der gleiche Teil vermessen würde, er wechselt jedoch mit der Härte. Da wir nun weder Strahlen von gleicher Härte (homogene) erzeugen können, noch ein Instrument besitzen, das die Härten, die in einer Strahlung vereinigt sind, festzustellen erlaubt, so zeigen alle Dosierungsinstrumente bei härteren Strahlen weniger, bei weicheren mehr an als eingefallen ist; wieviel mehr oder weniger läßt sich nicht feststellen. Es lag daher nahe, die Meßkörper so dick zu wählen, daß nicht eine zufällig absorbierte, sondern alle oder fast die ganze Strahlung von ihnen absorbiert wird, also nach der Christenschen Nomenklatur, die Flächenenergie. Wird die ganze Strahlung aufgefangen, dann ist es gleichgültig, von welcher Härte sie gewesen ist, das Instrument zeigt ihre volle Quantität oder Flächenenergie an usw.“ Gran weist dann darauf hin, daß dies für die Selenzelle mit ihrer dünnen Selenschicht nicht zutreffe.

Weißenberg (476) betont, daß alle Intensimeter nicht Flächenenergie messen, sondern Absorption d. h. Röntgenenergien, die pro Zeiteinheit in mehr oder weniger dicken Schichten absorbiert werden, und macht auf die so entstehenden Fehlerquellen aufmerksam.

Grann (464) nimmt ferner als wahrscheinlich an, daß die Selenzelle für verschieden harte Röntgenstrahlen nicht gleich

empfindlich ist. Da die Selenzelle vom gewöhnlichen Licht das rote stärker anzeigt als anderes, so ist es möglich, daß sie auch auf gewisse Wellenlängen der Röntgenstrahlen mehr reagiert, obwohl in ihnen geringere Energie enthalten ist als in anderen weniger wirksamen. Holzknecht und Weißenberg (466) weisen darauf hin, daß nach den Untersuchungen von Sadler und Barkla (264) das Selen tatsächlich selektive Absorption zeigt d. h. gewisse Strahlungen stärker absorbiert und dadurch mehr Strahlung anzeigt als wirklich vorhanden ist. Dies gilt aber nur für eine sehr weiche Strahlenart, also bei weicher Röhre ohne Filtrierung. Wenn man jedoch die Röntgenstrahlung auch nur durch eine kaum 1 mm dicke Aluminiumplatte hindurchsendet (filtriert), so wird die der Genauigkeit der Selenzelle gefährliche Strahlung vernichtet. Die Selenzelle arbeitet also in diesem die selektive Absorption betreffenden Punkte fehlerfrei.

Der Name des Instrumentes „Intensimeter" sagt schon, daß es zu Intensitätsmessungen gebraucht werden soll. Das Intensimeter soll die Strahlenenergie messen, die in einer bestimmten Zeit z. B. in der Minute durch die Selenschicht geht. Der Ausschlag des Intensimeters gibt eine Zahl an, der die Benennung F zukommt. Es bedeutet z. B. der Ausschlag 10, daß von der Röntgenröhre in der Minute eine Strahlung von 10 F in die Selenschicht eingestrahlt wird. Der Ausschlag des Instrumentes bleibt, wie schon erwähnt, für kurze Messungen konstant und gibt also für ein und dieselbe Strahlung stets die gleiche F-Zahl an. Die Dosis, die ein Patient in einer gewissen Zeit z. B. in n Minuten erhält, ist daher gleich n . F Umgekehrt kann man aus dem Ausschlag auch die Zahl der Minuten ersehen, die zur Erzielung einer Volldosis nötig sind.

Immelmann und Schütze (440) haben den gesetzmäßigen Zusammenhang des Intensimeterausschlages mit der Strahlenintensität untersucht, indem sie bei allen möglichen Härtegraden die Auffangedose in wechselnden Fokusabstand brachten. Sie gingen von der Ansicht aus: Wenn das Instrument wirklich die Strahlenintensität mißt, so müssen seine Angaben umgekehrt proportional mit dem Quadrat des Fokusabstandes sich ändern. Sie finden bei allen angewendeten Härtegraden das Gesetz von der quadratischen Abnahme der Intensität bestätigt und schließen daraus, daß das Intensimeter von Fürstenau tatsächlich die Strahlenintensität anzeigt.

M. Meyer (491) bemerkt zu dieser Auffassung: „Mit dem Versuch scheint mir nur bewiesen, daß das Gesetz vom Quadrat der Entfernung der Röntgenstrahlen zutrifft und die Selenzelle entsprechend konstant arbeitet, aber dem Schluß, daß tatsächlich deshalb die Selenzelle Intensitäten mißt, vermag ich nicht zu folgen; denn wenn bei ein und demselben Ver-

such der Härtegrad der gleiche bleibt, so wird nicht nur die Intensität, sondern auch die Dosis entsprechend dem Quadrat der Entfernung in der Zeiteinheit ihre Werte ändern. Auf diese Weise ist die Frage nicht zu beantworten und es wird mir sehr interessant sein, in einer im Rahmen der Sonderkommission demnächst erscheinenden ausführlichen Arbeit des Erfinders des Instrumentes zu erfahren, wie er den Beweis dafür, daß tatsächlich Intensitäten mit dem von ihm gewählten Selenzellentyp gemessen werden, liefern wird. Einstweilen schließe ich mich der Ansicht Holzknechts und seiner Mitarbeiter insofern an, als ich mit ihnen annehme, daß die Fürstenausche Selenzelle nur denjenigen Teil der Strahlung anzeigt, den sie absorbiert, und nicht die ganze Strahlung, daß sie also nicht Intensität, sondern Dosis mißt. Die Größe der Dosis ist natürlich auch von dem Härtegrad der die Zelle treffenden Strahlung abhängig, ebenso wie von dem Atomgewicht und der Schichtdicke der Auffangedose."

Tatsächlich sind mit dem Instrument nicht bloß quantitative, sondern auch qualitative Messungen möglich. Man kann aus dem Rückgang des Galvanometerausschlages, den man beim Einschieben von verschieden dicken Filtern zwischen Röntgenröhre und Selenzelle erhält, auf den Charakter des Strahlengemisches schließen. Bestimmt man den Ausschlag (die Intensität) zuerst bei ungeschützter Selenzelle, dann z. B. bei Zwischenschaltung eines 1 mm dicken Aluminiumfilters, so kann man den durch das Filter absorbierten Bruchteil der Gesamtintensität als Maß für den Härtegrad der Strahlung benützen.

Immelmann und Schütze (440) haben den Vorgang der Absorption innerhalb der verschiedensten Materialien verfolgt, da die Frage, welcher Bruchteil der Strahlungsintensität unter beliebigen Schichtdicken noch vorhanden ist, für die Tiefentherapie von großer Bedeutung ist. Die Versuche stellten sie in der Weise an, daß sie zuerst bei unbedeckter Selenzelle die Intensität der Strahlung mit dem Intensimeter bestimmten und dann bei gleichbleibender Strahlungsintensität immer dickere Filter aus ein und demselben Material einschalteten. Auf diesem Wege ist es leicht möglich sich über den Härtegrad einer Röhre in objektiverer Weise zu orientieren als mit anderen bisher verwendeten Hilfsmitteln. Fig. 186 veranschaulicht die auf diesem Wege gefundenen Absorptionskurve für Aluminium; auf der Abszisse sind die Schichtdicken des Aluminiums gemessen in mm, auf der Ordinate die beobachteten Intensitäten (die F-Zahlen) aufgetragen.

Die Selenzelle kann auch zur Feststellung des Härtegrades der Strahlung durch die Halbwertschicht, wie Th. Christen vorgeschlagen, benutzt werden. Unter Halbwertschicht verstehen wir diejenige Schichtdicke, die man einschalten

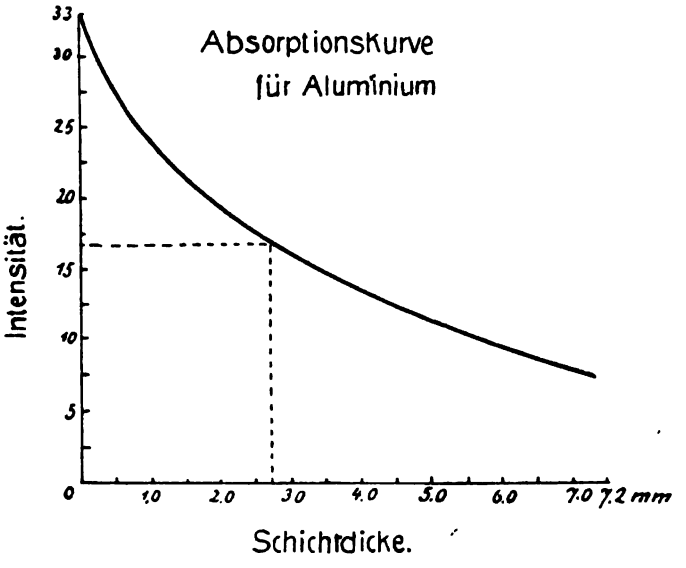


Fig. 186

muß, um eine halb so große Intensität zu erzielen wie ohne Filter. Zur Bestimmung der Halbwertschicht macht man erst eine Ablesung, wenn die Röntgenstrahlung auf die ungeschützte Zelle auffällt; dann schiebt man in den Gang der Strahlung zwischen Röhre und Zelle soviele Filter

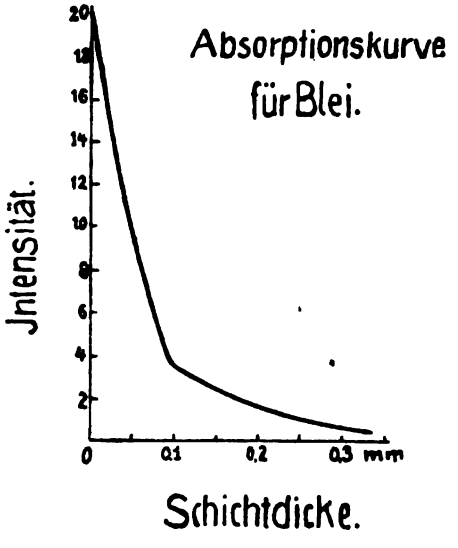


Fig. 187.

ein, bis der Galvanometerzeiger die Hälfte der zuerst abgelesenen F-Zahl angibt. Die eingeschaltete Schichtdicke ist nunmehr ein Maß für die Halbwertschicht der untersuchten Strahlung. Aus der Kurve in Fig. 186 ist die Halbwertschicht leicht zu ersehen. Die Hälfte der Anfangsintensität 33 ist 16,5 und dieser entspricht eine Filterdicke von 2,7 mm Aluminium.

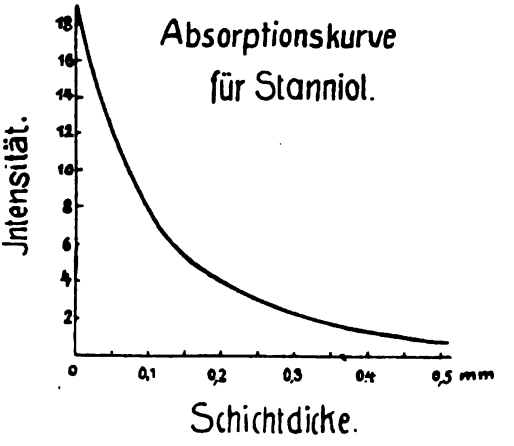


Fig. 188.

Die Fig. 187—190 enthalten die entsprechenden Absorptionskurven für Blei, Stanniol, Neusilber, Pappe.

Bekanntlich tritt eine Härtung der Röntgenstrahlen eines bestimmten Härtegrades ein, wenn man dieselben

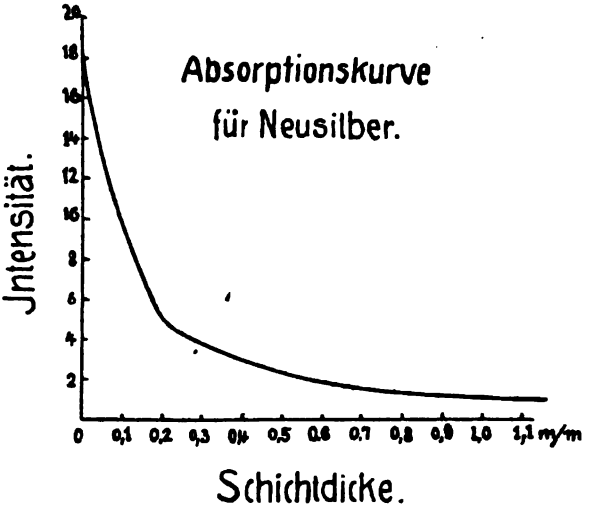


Fig. 189.

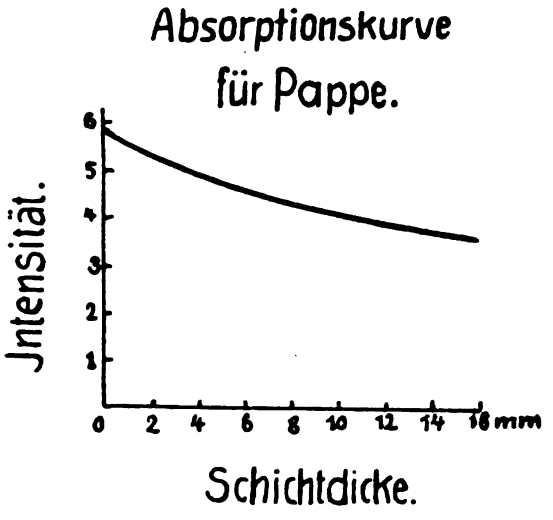


Fig. 190.

durch ein Filter hindurchgehen läßt (Röntgensches Absorptionsgesetz). Immelmann und Schütze haben nun interessante Versuche mit 2 verschiedenartigen Filtern angestellt, wobei bald das eine, bald das andere oben lag. Die Strahlenintensität, unterhalb der beiden Filter gemessen, muß bei verschiedener Reihenfolge der beiden Filter verschieden groß sein, obwohl die gleiche Strahlenmenge die gleiche Filterkombination passiert. Bei der Kombination Stanniol-Aluminium z. B. sind die Intensitätswerte weit größer, wenn das stärker härtende Aluminium oben (der Röntgenröhre näher) liegt als wenn die Strahlen zuerst durch das Stanniol gehen. Die durch das Aluminium stark gehärtete Strahlung geht eben durch das Stanniol leicht hindurch, während im entgegengesetzten Fall das Stanniol nur eine minimale Härtung verursacht, so daß die Strahlen das Aluminiumfilter nur mehr stark geschwächt passieren. Stanniol absorbiert wohl Strahlen, aber es transformiert nicht den Charakter der Strahlung nach der härteren Seite hin. Es lassen sich auf diesem Wege die Materialien leicht feststellen, die sich für die Praxis zur Härtung der Röntgenstrahlen besonders empfehlen.

Wir haben gesehen, daß die Röntgenstrahlen beim Durchgang durch ein Filter eine Härtung erleiden; diese wächst im allgemeinen mit der Dicke der Schicht. Es existiert aber für jedes Material eine bestimmte Schichtdicke, die kritische Schichtdicke, jenseits der eine weitere Zunahme der Dicke nur mehr eine Absorption, aber keine Härtung und somit keine Filtration der Strahlen mehr verursacht. Immelmann und Schütze (440) haben mit dem Intensimeter die

Ausschläge für eine große Versuchsreihe festgestellt, wobei sie die Schichtdicke eines Aluminiumfilters von Versuch zu Versuch um 0,4 mm vergrößerten bis zu 7,2 mm. Wenn man von Schichtdicke zu Schichtdicke jedesmal den Absorptionskoeffizienten aus den gemessenen Intensitäten berechnet, so muß dieser um so geringer ausfallen, je größer die Schichtdicke wird. Fig. 191 zeigt uns die erhaltene Kurve; auf der Abszisse sind die Schichtdicken aufgetragen, auf der Ordi-

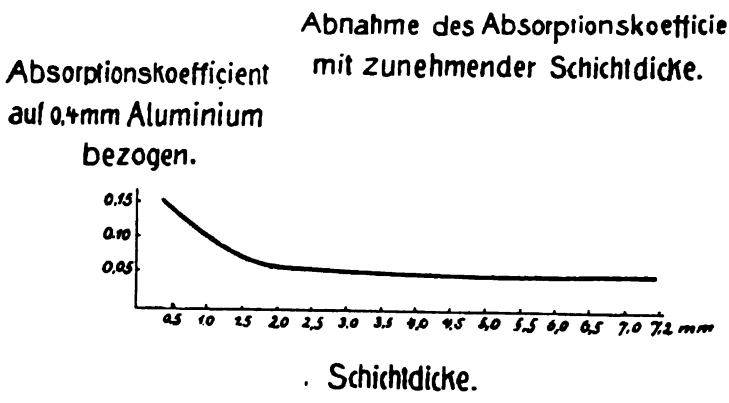


Fig. 191.

nate die Absorptionskoeffizienten, bezogen auf 0,4 mm Aluminium. Man sieht aus der Kurve, daß der Absorptionskoeffizient mit Zunahme der Schichtdicke abfällt, daß also die Strahlung mit wachsender Schichtdicke härter wird (Röntgensches Absorptionsgesetz). Die Härtung erfolgt aber nur bis ca. 3 mm Aluminium; daraus ergibt sich die Tatsache, daß die günstigste Stärke der Aluminiumfilter für die Tiefentherapie 3 mm beträgt; jede weitere Zunahme der Filterdicke hat nur mehr eine Schwächung, aber keine Härtung der Strahlen mehr zur Folge.

In Fig. 192 sind die Absorptionskurven wiedergegeben, wie sie R. Mayer (467) mit dem Intensimeter zum Zwecke des Vergleichs von drei verschiedenen Röntgenröhren unter 3 mm Aluminium erhielt. Kurve A wurde erhalten durch eine Lilienfeldröhre mit Homogenisierwiderstand, Kurve B durch eine Müller-Rapidröhre, Kurve C durch eine Lilienfeldröhre ohne Homogenisierwiderstand. Dabei wurden als Filter Ebenholzklötze von 1 cm, 4 cm und 5 cm Dicke verwendet. Diese 3 Klötze geben zusammen eine Schichtdicke von 10 cm. Zuerst wurde der Ausschlag bei 10 cm Schichtdicke abgelesen, dann der Klotz von 5 cm abgehoben, hierauf der von 4 cm, schließlich der von 1 cm. Der ganze Versuch dauerte nur 40 Minuten.

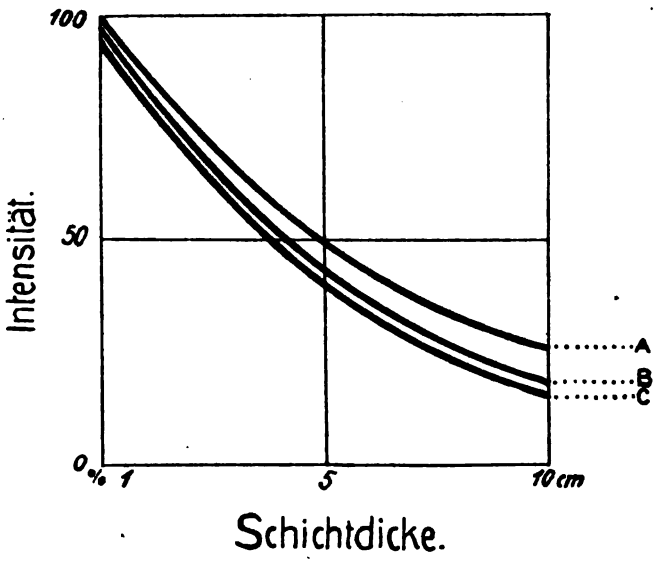


Fig. 192.

Wachtel (499) hat mit dem Intensimeter Messungen an verschiedenen Röntgenröhren vorgenommen, um die Strahlungen auf ihre Konstanz zu prüfen. Absorptionsmessungen ergaben, daß die Röhren der heutigen Therapiebetriebe nicht einmal während ein und derselben Bestrahlung gleichmäßige Strahlen aussenden. Die Intensität und die Härte der Strahlung wechseln, während die Röhre eingeschaltet ist, und zwar regellos zum besseren oder zum schlechteren. Fast jede Einschaltung der Röhre bringt bei demselben Instrumentar eine andere Strahlung heraus. Die Schwankungen der Konstanz sind, in Härte und Oberflächendosiszahlen ausgedrückt, oft gering, für die physiologische Wirkung der Strahlen aber von beträchtlicher Bedeutung.

Diese Erfahrungen von Wachtel sind für die Praxis von hoher Wichtigkeit. Zeigen sie uns doch, daß das Intensimeter zur vergleichenden Prüfung von Röntgenröhren verschiedener Fabrikate sowie zur Beurteilung der zum Betrieb nötigen Nebenapparate und der verschiedenen Schaltungen ein sehr geeignetes Mittel ist, andererseits weisen sie uns auf die Notwendigkeit hin, die Röntgenstrahlung während einer länger dauernden Bestrahlung öfter zu messen.

Der gewissenhafte Arzt wird somit bei Verwendung des Fürstenauschen Intensimeters zur Kontrolle der Röntgenstrahlung für Heilzwecke folgende Regeln zu beachten haben: Während jeder Messung muß der das Galvanometer enthaltende Kasten abseits hinter einer Schutzwand stehen und

leitend mit der Erde verbunden sein. Vor der eigentlichen Messung bringt der Arzt den Schalter in die Stellung „Prüfen" und führt den Galvanometerzeiger, falls dies nötig sein sollte, durch Drehen am Regulierknopf auf den roten Prüfstrich P. Dann gibt man dem Schalter die Stellung „Ein" und bringt die Auffangdose in die gleiche Entfernung vom Fokus der Röntgenröhre, in der nachher die Bestrahlung des Körpers vorgenommen werden soll. Hierauf schaltet man die Röntgenröhre ein und liest nach wenigen Sekunden den Ausschlag ab, der die F-Zahl pro Minute angibt. Nach Mayer (467) soll die Bestrahlungsdauer der Selenzelle so abgekürzt werden, daß das Produkt aus F-Zahl (Galvanometerausschlag) und Zahl der Belichtungssekunden 400 nicht übersteigt. Aus der abgelesenen F-Zahl läßt sich dann die Bestrahlungsdauer, innerhalb der eine gewünschte Volldosis verabreicht werden kann, leicht berechnen. Nimmt die Bestrahlung des zu behandelnden Körpers längere Zeit in Anspruch, so ist eine mehrmalige Prüfung der Röntgenstrahlung, die ja immer nur wenige Sekunden dauert, sehr zu empfehlen. Von Zeit zu Zeit wird man sich über den Härtegrad der zur Verwendung kommenden Röhren orientieren, indem man mittels Aluminium- oder Ebenholzfilter den Absorptionskoeffizienten bezw. die Halbwertschicht bestimmt. Bei der Festsetzung des Härtegrades spielt der Abstand von Selenzelle und Röntgenröhre keine Rolle, da es sich hier lediglich um einen Vergleich der gewonnenen Resultate handelt.

Fassen wir die Bedeutung des Fürstenauschen Intensimeters für den Arzt noch einmal kurz zusammen, so ergeben sich als die wichtigsten Anwendungsmöglichkeiten:

a) Messung der bei einer einzelnen Bestrahung nötigen bezw. verabreichten Lichtmenge,
b) Messung der für eine röntgenographische Aufnahme nötigen Lichtmenge,
c) Messung der Strahlenhärte,
d) Untersuchung der Materialien auf ihre Fähigkeit Strahlen zu härten,
e) Beurteilung von Röntgenröhren verschiedener Fabrikate und der zum Betrieb nötigen Nebenapparate (nebst Schaltungen) bezüglich ihrer Qualität.

Obwohl das Fürstenausche Intensimeter sich erst allmählich in die Praxis einführt, stehen ihm doch bereits von mehreren Ärzten die besten Empfehlungen zur Seite, so insbesondere von den Ärzten Dr. Immelmann (439 und 440), Schütze (440), M. Meyer (468 und 491) und R. Mayer (467). So schreibt M. Meyer: „Am dringendsten ist wohl von allen Seiten das Bedürfnis empfunden worden, grundlegend mit der

völlig subjektiven Art und Weise der Ablesung, wie sie der zur Messung dienende Farbenvergleich unvermeidlich mit sich bringt, zu brechen und an die Stelle jener ungenauen Ablesung von Farbreaktionen die einzige genaue und objektive durch Zeigerausschlag zu setzen, wie wir sie von anderen technischen Meßinstrumenten her gewohnt sind ..... Ich erblicke nach meinen bisherigen eingehenden Erfahrungen in dem Intensimeter infolge der mit ihm verknüpften wesentlichen Vereinfachung der Methodik und der Objektivität der Zeigerablesung einen erheblichen Fortschritt für die Dosierung und Härtemessung der Röntgenstrahlen..... Das Intensimeter genügt dem Laboratoriumsversuch wie der Praxis in weitgehendstem Maße."

M. Immelmann berichtet darüber:

„In meinem Betriebe habe ich das Intensimeter zunächst neben unseren bis dahin benutzten Methoden angewendet, bis ich mich durch die zahlreichen Vergleichsmessungen davon überzeugt habe, daß die Angaben des Intensimeters stets durchaus exakt waren. Ich wende es jetzt dauernd zur Ausdosierung von Therapieröhren und zur Nachkontrolle dieser Ausdosierung bei den täglichen weiteren Bestrahlungen an und erblicke die Hauptvorzüge des Apparates in der außerordentlichen Einfachheit seiner Handhabung, die es gestattet, eine Röhrenausdosierung, die ja bei Anwendung der Sabouraud-Tablette, wenn man genau sein will, so lange dauert, bis die Tablette vollkommen verfärbt ist, innerhalb weniger Sekunden vor jeder Bestrahlung vorzunehmen. Infolge der objektiven Ablesung kann es keine Irrtümer mehr geben, so daß selbst weniger geschultes Personal ohne weiteres in der Lage ist, exakt zu dosieren; wissen wir doch alle, wie heikel gerade für einen weniger Geübten die wirklich einwandfreie Ablesung resp. Vergleichung von Verfärbungsgraden ist. Einen Zeigerausschlag auf einer Skala kann aber jeder ablesen. Zusammenfassend spreche ich das Fürstenau'sche Intensimeter als wertvolle Bereicherung des Röntgeninstrumentariums an, das zweifellos eine uns allen recht fühlbar gewesene Lücke auszufüllen berufen sein dürfte, und ich zweifle nicht daran, daß der gewissenhafte Röntgentherapeut nicht zögern wird, neben seine bisher benutzten subjektiven Dosierungsmethoden die objektive zu setzen."

Infolge des großen Interesses, das man zur Zeit der Röntgenstrahlmessung mittels Selenzellen entgegenbringt, ist hier die einschlägige Literatur eigens zusammengestellt.

1. J. W. Giltay (Nature 54, 109, 1896) Röntgenstrahlen und der Widerstand des Selens.

2. Perreau (Comptes rendus 129, 956, 1899; auch Beiblätter zu den Annalen der Physik 24, 135, 1900) Einfluß der X-Strahlen auf den elektrischen Widerstand des Selens.

3. Himstedt (Bericht der Naturforscher-Gesellschaft Freiburg XI, 126, 1900 und Annalen der Physik 4, 531, 1901) Ueber einige Versuche mit Becquerel- und Röntgenstrahlen.

4. Bloch (Comptes rendus 132, 914, 1901 und Chemisches Centralblatt 1, 1078, 1901) Wirkung der Radiumstrahlen auf das Selen.

5. Aubel (Comptes rendus 136, 929, 1903; auch Physikalische Zeitschrift 4, 807, 1903) Ueber den Einfluß der radioaktiven Körper auf das elektrische Leitvermögen des Selens.

6. F. C. Brown und J. Stebbins (Physical Review of the American Physical Society 25, 505, 1907; auch Beiblätter zu den Annalen der Physik 32, 1061, 1908) Einfluß der Radiumstrahlung auf den Widerstand der Selenzellen.

7 G. Athanasiadis (Annalen der Physik 27, 890, 1908) Wirkung der Röntgenstrahlen auf den elektrischen Widerstand des Selens.

8. L. S. Mc Dowell (Physical Review of the American Physical Society 30, 474, 1910; auch Beiblätter zu den Annalen der Physik 34, 970, 1910)) Die Erholung der Selenzellen nach Erregung mittels X-Strahlen.

9. H. Guilleminot (Comptes rendus 156, 1155, 1913) Ueber die Variation des Widerstandes von Selen, das von X-Strahlen und Radiumstrahlen getroffen wird.

10. M. Immelmann (Röntgentaschenbuch 6, 25, 1914) Das Fürstenausche Intensimeter.

11. M. Immelmann und J. Schütze (Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen 22, 533, 1914) Absorptionsmessungen mit dem Fürstenauschen Intensimeter.

12. P. Volz (Physikalische Zeitschrift 16, 209, 1915) Ueber die Verwendbarkeit des Selens zu Röntgenstrahlenenergiemessungen.

13. R. Fürstenau (Physikalische Zeitschrift 16, 276, 1915) Ueber die Verwendbarkeit des Selens zu Röntgenstrahlenenergiemessungen.

14. P. Volz (Physikalische Zeitschrift 16, 308, 1915) Ueber die Verwendbarkeit des Selens zu Röntgenstrahlenenergiemessungen.

15. Th. Christen (Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen 23, 214, 1915/16). Messung heterogener Röntgenstrahlen.

16. H. Holzknecht und C. Weißenberg (Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen 23, 257, 1915/16) Zur speziellen technischen Strahlenmessung.

17. R. Grann (Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen 23, 267, 1915/16). Prinzipielles über die Selenzelle.

18. R. Mayer (Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen 23, 283, 1915/16) Zur praktischen Anwendung der Selenzelle unter Vermeidung ihrer Fehler.

19. R. Grann (Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen 23, 289, 1915/16) Ueber die Benützung des photochemischen Vorganges der Kalomelausscheidung zur Messung von Röntgenstrahlen und über photochemische Methoden überhaupt.

20. C. Weißenberg (Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen 23, 297, 1915/16) Wege und Ziele in der Dosimeterfrage.

21. M. Meyer (Deutsche Medizinische Wochenschrift 41, 1312, 1915) Praktische Erfahrungen mit dem Fürstenauschen Intensimeter.

22. M.Meyer (Strahlentherapie 7, 473, 1916) Das Fürstenausche Intensimeter.

23. H. Wachtel (Strahlentherapie 7, 491, 1916) Ueber die Inkonstanz der Strahlungen der heutigen Röntgenröhren und Dosierungsversuche mit dem Fürstenauschen Selenintensimeter.

VIII. Automatische Signal- und Registrierapparate.

Infolge ihrer hohen Lichtempfindlichkeit vermag die Selenzelle nicht bloß das Auftreten und Verschwinden eines Lichtscheines, sondern auch den Eintritt und Verlauf bestimmter Ereignisse anzuzeigen. Sie eignet sich daher in ganz hervorragendem Maße zum Bau von Signal- und Registrierapparaten.

Die Einrichtung eines Signalapparates für stärkere Lichteindrücke ist aus Fig. 193 ersichtlich. Wir haben 2 Stromkreise, von denen der erste aus der Batterie I, einer Selenzelle und einem Relais besteht, während der

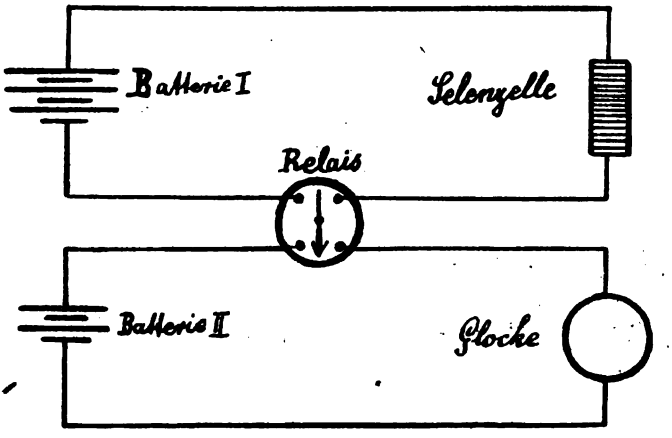


Fig. 193.

zweite die Batterie II, eine Glocke und eine Kontaktvorrichtung enthält. Solange die Selenzelle nicht beleuchtet ist, fließt nur ein schwacher Strom durch den Stromkreis I, so daß das Relais nicht in Tätigkeit tritt; die Kontaktvorrichtung ist in diesem Falle nicht geschlossen und der 2. Stromkreis unterbrochen. Fallen aber Lichtstrahlen auf die Selenzelle, so wächst die Stromstärke im Stromkreis I rasch an, das Relais tritt in Tätigkeit und schließt den Kontakt; dadurch wird der 2. Stromkreis geschlossen und die Glocke ertönt. Bei Verdunkelung wird der Kontakt durch das Relais wieder aufgehoben und die Glocke hört auf zu läuten. An Stelle der Glocke kann natürlich auch irgend eine andere Signalvorrichtung z. B. eine rote Lampe treten.

Fig. 194 stellt einen Signalapparat der Firma Clausen & Bronk dar. Die Selenzelle ist mit zwei Elementen im hinteren Kasten und einem hochempfindlichen Relais verbunden. Legt man an das Instrument noch eine Batterie von 12—18 Volt an, so meldet die Glocke jede Belichtung der Zelle.

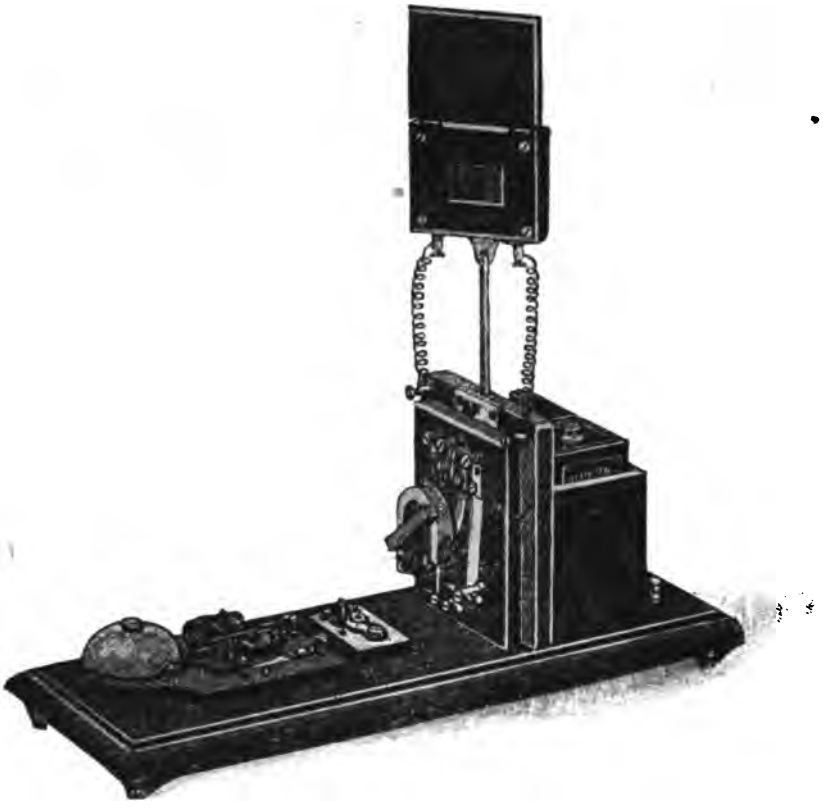


Fig. 194.

Da bei der in Fig. 193 angegebenen Schaltung das Relais auf den schon im Dunkeln vorhandenen Strom nicht reagieren darf, kommt hier kein allzu empfindliches Relais in Betracht. Hat z. B. die Stromquelle 50 Volt und die Selenzelle 50 000 Ohm, so ist die Stromstärke im 1. Stromkreis ungefähr 1 Milliampere, da der Widerstand des Relais gegenüber dem hohen Selenwiderstand kaum in Betracht kommt. Wenn nun unter der Einwirkung der Lichtquelle die Stromstärke auf 10 Milliamp. ansteigt, so wird für diesen Fall ein Relais von 3 Milliamp. Empfindlichkeit recht gute Dienste leisten; dagegen wird ein Relais, das bereits auf einen Strom von 2

Milliamp. anspricht, den Kontakt bei Verdunkelung vielleicht nicht sofort wieder aufheben, da der Strom infolge der Trägheit des Selens noch nicht unter 2 Milliamp. gesunken ist; insbesondere würde der Apparat mehrere rasch auf einander folgende Lichteindrücke nicht einzeln anzeigen können. Ist die Stärke der Lichtquelle nur gering und somit die Stromdifferenz bei Licht und Dunkel nur unbedeutend, so läßt sich die angegebene Schaltung nicht verwenden.

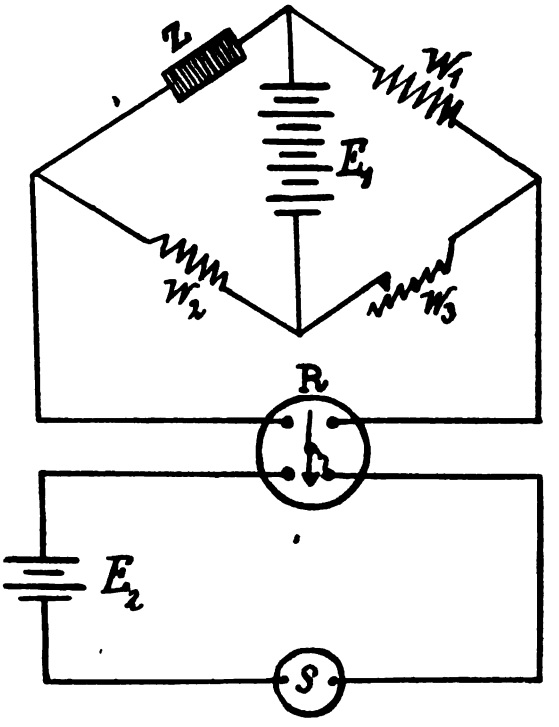


Fig. 195.

Ein Signalapparat für schwächere Lichteindrücke wird am besten mit einer Schaltung ausgerüstet, bei der im Dunkeln überhaupt kein Strom durch das Relais fließt; eine solche ist in Fig. 195 abgebildet. In den 4 Zweigen der Wheatstoneschen Brückenschaltung liegen 2 feste Widerstände W_1 und W_2, der Regulierwiderstand W_3 und die Selenzelle Z; bei E befindet sich die Stromquelle, bei R ein hochempfindliches Relais. Die Anwendung des Regulierwiderstandes ermöglicht es jeder Zeit R stromlos zu halten, solange die Selenzelle im Dunkeln liegt. Fällt dann der geringste Lichtschein auf Z, so schließt das Relais den 2.

Stromkreis und die Signalvorrichtung S tritt in Tätigkeit. Derartige Signalapparate reagieren z. B. noch auf ein brennendes Zündholz in einer Entfernung von 8 m.

Ein solcher Apparat wird überall vortreffliche Dienste leisten, wo das plötzliche Auftreten einer Lichterscheinung eine Gefahr bedeutet; er meldet den Ausbruch eines Brandes in Fabriklagern, Bergwerken usw.; er dient als Detektivapparat, indem er das Betreten eines Raumes mit Licht oder das Öffnen eines Faches anzeigt und schützt somit gegen Einbruch, Spionage etc.; er kann im Kriege die Annäherung des Feindes an bestimmte Punkte verraten, falls dieser eine Taschenlampe oder ein brennendes Zündholz zur Orientierung benützt. Wertvolle Dienste dürfte der Apparat zur Sicherung der Eisenbahn leisten, indem er die Vorbeifahrt oder Ankunft des Zuges an einer bestimmten Stelle sofort in einer beliebigen Station meldet. Dazu kommen noch zahlreiche andere Verwendungsmöglichkeiten.

Die Anordnung kann auch so getroffen werden, daß beim Auslöschen einer die Selenzelle beleuchtenden Flamme ein Signal gegeben wird. Die Widerstände sind dann derart zu regulieren, daß das Relais während der Belichtung der Selenzelle keinen Kontakt gibt, beim Erlöschen des Lichtes aber den Kontakt schließt, so daß die Alarmglocke ertönt bezw. das Signal betätigt wird. Diese Einrichtung kann z. B. zur Sicherung der Eisenbahnen und der Schiffe an der Küste die besten Dienste leisten, indem sie das Auslöschen jeder Signallaterne durch Ertönen einer Glocke oder Entzündung einer farbigen Laterne in dem Wartehäuschen meldet.

Fig. 196 enthält die Abbildung eines Apparates für automatische Glühlampenentzündung von Clausen und Bronk. Die Schaltung ist derartig, daß der 2. Stromkreis unterbrochen ist, solange die Zelle Licht empfängt, während bei Eintritt der Abenddämmerung das Relais betätigt, der Kontakt geschlossen und die Lampe entzündet wird. Bricht der Tag an und die Zelle erhält Licht, so wird der 2. Stromkreis wieder unterbrochen und die Lampe erlischt. Durch diese Anordnung kann man es also erreichen, daß bei Eintritt der Dämmerung in einem bestimmten Raum die Lampen selbsttätig sich entzünden und bei Tagesanbruch wieder von selbst erlöschen, so daß in dem Raum immer für Beleuchtung, sei es für natürliche oder künstliche, gesorgt ist, ohne daß sich irgend jemand darum zu kümmern hat. Die Einrichtung kann natürlich auch für ganze Reihen von Lampen als automatischer Laternenanzünder und -löscher verwendet werden.

Stellt man bei dem in Fig. 196 abgebildeten Apparat die Glühlampe der Selenzelle direkt gegenüber, so zeigt sich folgende Erscheinung. Bei Eintritt der Dunkelheit oder Ver-

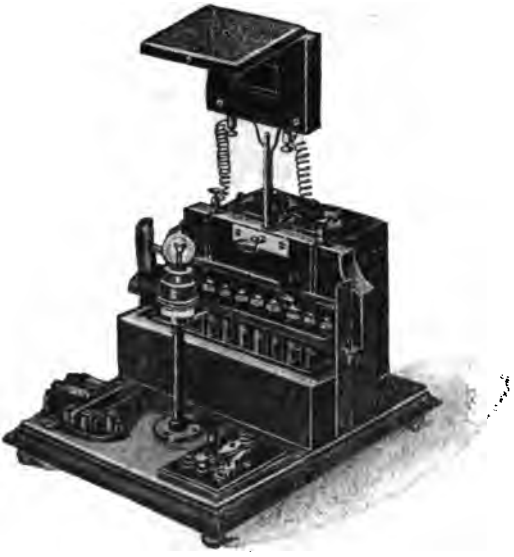


Fig 196.

dunkelung der Selenzelle entzündet sich die Glühlampe. Diese wirft nun ihr Licht auf die Selenzelle, so daß die Lampe wieder erlischt. Da sich infolge der eingetretenen Dunkelheit die Lampe wieder entzündet, haben wir ein beständiges Entzünden und Erlöschen der Lampe in rascher Aufeinanderfolge. Die Geschwindigkeit der Unterbrechungen ändert sich mit der Entfernung von Glühlampe und Zelle.

Fig. 197 zeigt einen automatischen Weckapparat der Firma Julius Pintsch, wie er auf Leuchttürmen Anwendung findet, um den Wärter darauf aufmerksam zu machen, daß eine Signallaterne verlöscht ist oder nicht mehr die nötige Lichtstärke hat.

Automatische Selenzündapparate zum selbsttätigen Zünden und Löschen leuchtender Seezeichen verwendet man vielfach bei Bojen und Baken. Die Baken (Fig. 198), die an Stromufern, am Meeresstrande und auf Sandbänken zur Andeutung des Fahrwassers und zur Warnung vor gefährlichen Stellen errichtet werden, müssen für die Nacht mit Leuchtkörpern ausgerüstet werden. Ebenso trägt die Boje (Fig. 199), eine auf dem Wasser schwimmende als Seezeichen benützte Tonne, auf dem Meere gewöhnlich einen Leuchtapparat. Um nun die Flammen solcher, oft schwer zugänglichen, leuchtenden Seezeichen während des Tages, wo sie ganz zwecklos brennen, auszulöschen und dadurch Gas bezw. Strom zu sparen, kann man sich einer auto-

Fig. 197.

matischen Zünd- und Löschvorrichtung bedienen. Eine durch Tageslicht selbsttätig wirkende Vorrichtung dieser Art von der Firma Julius Pintsch soll im Folgenden genauer beschrieben werden.

Um die Selenzelle gegen die Einflüsse der Witterung zu schützen, ist sie in einem gut schließenden Metallgehäuse untergebracht, dessen Oberteil durch eine Glasglocke abgeschlossen ist. Die Selenzelle ist mit einem hochempfindlichen Relais und mit einer Batterie von mehreren kleinen Trockenelementen oder Akkumulatoren verbunden. Obwohl der Strom beständig durch diesen Stromkreis fließt, wird die Batterie infolge des hohen elektrischen Widerstandes der Selenzelle so langsam entladen, daß sie ungefähr ein Jahr zum ununterbrochenen Betrieb ausreicht.

Die Leuchtbojen tragen gewöhnlich einen mit Gas gespeisten Leuchtapparat. Der Tonnenkörper bildet zugleich

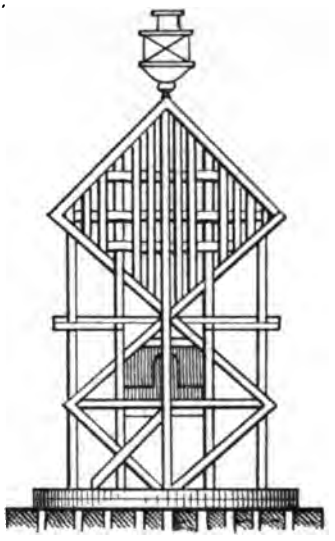


Fig. 198.

den Gasbehälter, aus dem das Gas unter konstantem Druck durch einen Regulator hindurch zum Brenner geleitet wird. Die Gasfüllung reicht für mehrere Monate ununterbrochener Brennzeit aus.

Wird bei Tagesanbruch die Selenzelle vom Tageslicht bestrahlt, so schlägt die Zunge des Relais aus und schließt

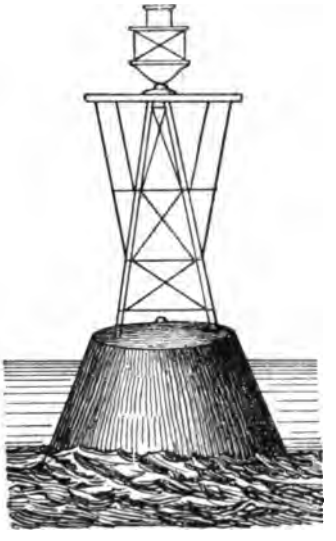


Fig. 199.

bei Berührung mit einem Kontakt einen besonderen Stromkreis. Ein in diesem liegender Elektromagnet betätigt nunmehr ein Hebelsystem und schließt das Gasventil so weit, daß nur mehr eine kleine Zündflamme während des Tages brennt.

Bei Eintritt der Dunkelheit wächst der Widerstand der Selenzelle und das Relais schlägt nach der anderen Seite aus; durch Berührung mit einem zweiten Kontakt wird wieder ein Strom geschlossen, ein Elektromagnet betätigt, das oben erwähnte Hebelsystem nach der anderen Seite bewegt und das Gasventil geöffnet. Das ausströmende Gas wird durch die Zündflamme entzündet und die Gasflamme kann nun brennen, bis das Tageslicht wieder auf die Selenzelle einwirkt.

Damit der Strom nicht dauernd durch den Elektromagnet fließt, wodurch unnütz Strom verbraucht würde, ist die Schaltung so eingerichtet, daß der Stromkreis sofort nach Schließung des Kontaktes und Betätigung des Hebels selbsttätig wieder unterbrochen wird, so daß nur morgens und abends einen Augenblick der Energieverbrauch stattfindet.

Bei Verwendung von elektrischem Licht ist die Apparatur etwas einfacher, da man die Lichtquelle direkt an die Stelle des Elektromagnets setzen kann. Auch kommt man mit einem einzigen Kontakt aus, der bei eintretender Dunkelheit geschlossen, bei Tagesanbruch unterbrochen wird.

Zum Schutze gegen die Feuchtigkeit befinden sich alle einzelnen wesentlichen Bestandteile des Apparates in luftdicht verschlossenen Blechkästen, die Selenzelle ist in eine luftleere Röhre eingeschlossen.

Fig. 200 zeigt eine Bakenlaterne, die mit der automatischen Zündvorrichtung ausgerüstet ist. In Fig. 201 sehen wir den geöffneten Batteriekasten nebst der Selenzelle.

In gleicher Weise kann man einen automatischen Alarmapparat zum Anzeigen von Schlagwettern in Kohlengruben konstruieren. Man läßt vor der Selenzelle beständig eine Flamme brennen und sorgt durch entsprechende Schaltung dafür, daß unter dem Einflusse der Leuchtflamme das Relais keinen Kontakt gibt. Sobald nun die Leuchtkraft der Flamme unter dem Einflusse des Grubengases eine Änderung erfährt, wird die Selenzelle beeinflußt, das Relais schließt den Kontakt und die Alarmglocke ertönt.

Zur Regulierung der Spannung hat man einen automatischen Zellenschalter konstruiert. Bei diesem Apparat verdeckt der Zeiger eines Voltmeters, solange die Spannung normal ist, mittels einer auf ihm befestigten Scheibe zwei Selenzellen gegen eine Glühlampe. Tritt eine Spannungsänderung ein, so wird der Zeiger abgelenkt und

setzt dadurch die eine oder andere Selenzelle dem Lichte aus. Jede Selenzelle bildet mit einer Stromquelle und einem Relais einen Stromkreis. Erfolgt z. B. eine Spannungsabnahme, wodurch der Zeiger nach links geht, so wird die rechte Selenzelle frei. Nun wird das zugehörige Relais und durch eine entsprechende Vorrichtung der Zellenschalter derartig betätigt, daß eine neue Zelle angeschlossen wird und die Spannung wieder zunimmt. Zum Speisen der Selenzellen kann der Zellenstrom selbst benützt werden.

Fig. 200.

Man kann die Selenzelle ferner zum automatischen Registrieren der Gewichtsab- und -zunahme einer Substanz mittels einer Wage benutzen. Derartige Gewichtsveränderungen beobachten wir z. B. bei verdunstenden und hygroskopischen Substanzen.

Sobald eine Wage auf 1 mg genau die Gewichtsveränderung einer Substanz registrieren soll, ist mit einer rein mechanischen Aufzeichnung durch eine Feder nach Art der Barographen nicht viel anzufangen, da hier die Reibung der Feder auf dem Papier viel zu groß ist. Zur Lösung der Aufgabe,

Fig. 201.

die einige g betragende Gewichtszu- oder -abnahme einer Substanz ununterbrochen während der Dauer von 5—6 Tagen auf 1 mg genau zu registrieren, kann man die photographische Registrierung benutzen, wobei jede Reibung vermieden ist.

Fig. 202 zeigt eine Vorrichtung dieser Art von Kuhlmann (358). Am Balken einer feinen Analysenwage (Tragkraft 200 g) befinden sich in der Verlängerung der Mittelschneide zwei Planspiegel S_1 und S_2, von denen der eine nach links

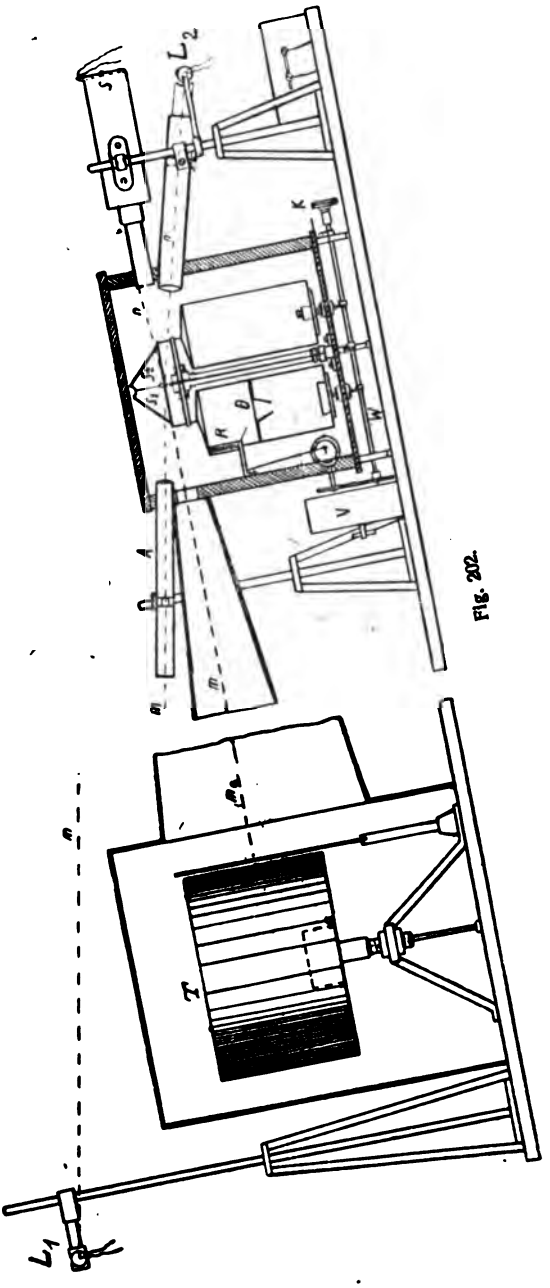


FIG. 202.

und der andere nach rechts gerichtet ist. Ungefähr 2 m von dem linken Spiegel entfernt ist an einem Stativ eine 2 Volt-Osram-Lampe L_1 angebracht. Das Bild des glühenden Fadens dieser Lampe wird mittels einer in dem Rohre A befindlichen Linse auf den linken Spiegel S_1 und von diesem auf die Registriertrommel T geworfen; letztere ist mit photographischem Papier belegt. Da der Spiegel an der Schwingung des Wagbalkens teilnimmt, wandert das Bild des Lichtfadens auf der Trommel von unten nach oben oder umgekehrt. Legt man eine Substanz, die einen allmählichen Gewichtsverlust erleidet, auf die linke Wagschale, dagegen einen Stoff, der eine Gewichtszunahme erfährt, auf die rechte Schale, so wird in beiden Fällen der linke Wagbalken gehoben und das Bild des Lichtfadens wandert auf der Trommel immer von unten nach oben. Hat z. B. der Spiegel zuerst die Stellung I (Fig. 203), so wird der von L_1 kommende Lichtstrahl nach I' zurückgeworfen; hebt sich der linke Wagbalken, wodurch der Spiegel in die Lage II gedreht wird, so erfolgt die Zurückwerfung des Lichtstrahls nach II'.

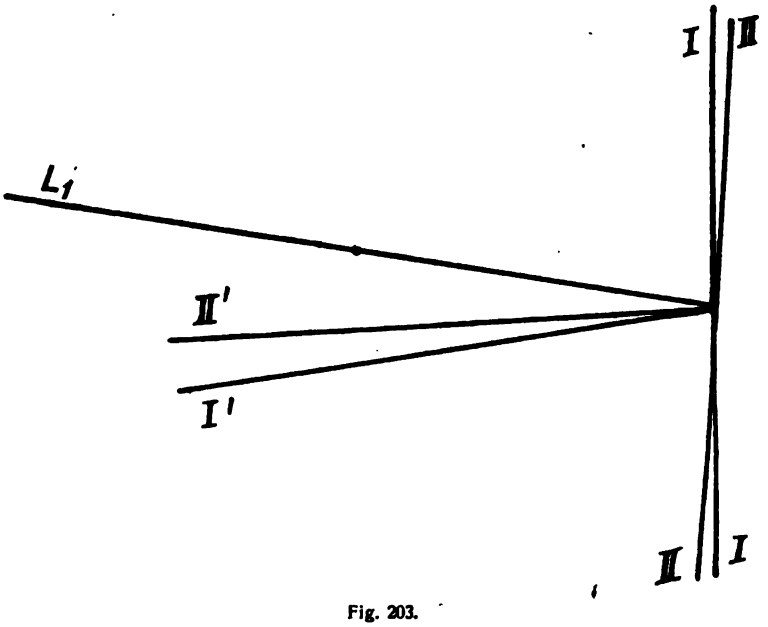


Fig. 203.

Hat man das Gefäß mit der zu untersuchenden Substanz auf die eine Wagschale gestellt, so muß man durch Auflegen von Gewichten auf die andere Wagschale Gleichgewicht herstellen. Die Empfindlichkeit der Wage ist derartig geregelt, daß das Bild bei einer Gewichtsveränderung von 1 mg genau

um 2 mm nach oben wandert. Da die Trommel T gleichzeitig durch ein Uhrwerk um ihre Achse gedreht wird, so kann man aus der photographisch aufgezeichneten Kurve ohne weiteres ablesen, wie groß die Gewichtsveränderung war und in welcher Zeit sie erfolgte.

Macht man die Höhe der Trommel bezw. des photographischen Papiers 200 mm, so erreicht der Lichtstrahl den oberen Rand genau nach einer Gewichtsveränderung von 100 mg. In diesem Moment wird die Wage automatisch durch ein Laufwerk V arretiert, ein Gewicht von 100 mg in den Becher B, der sich über der linken Wagschale befindet, geworfen und die Wage wieder ausgelöst. Nun ist an der Wage wieder Gleichgewicht hergestellt, da die Gewichtsänderung von 100 mg durch das Gewicht im Becher B ausgeglichen wird, so daß dann der Lichtstrahl m m wieder am unteren Rande des photographischen Papiers steht. In der ausgelösten Stellung bleibt die Wage nur solange, bis wieder eine Gewichtsänderung von 100 mg eintritt und das Laufwerk von neuem ausgelöst wird. Die automatische Auslösung des Uhrwerks V, das mit der Arretierungswelle W der Wage durch ein Zahnrad in Verbindung steht, geschieht auf folgende Weise: In dem gleichen Moment, in dem der von L_1 kommende Lichtstrahl m m die höchste Stelle der Trommel erreicht hat, wird von der 4 Volt-Osramlampe L_2 ein Lichtkegel mittels des rechten Spiegels (auf dem Wege n n) auf die in einem Kasten befindliche Selenzelle S geworfen. Die Selenzelle bildet mit einem Relais und einer Stromquelle einen Stromkreis. Fällt Licht der Lampe L_2 auf das Selen, so wächst die Stromstärke und die Zunge des Relais schließt einen zweiten Stromkreis; dadurch wird ein Elektromagnet erregt, der nunmehr die Hemmung der Arretierungswelle W löst und das Laufwerk V in Tätigkeit versetzt.

Die 100 mg Gewichte sind runde Platten aus Aluminium; sie befinden sich übereinander geschichtet in dem geschlitzten Rohr R. Ein Schieber, der mit dem Laufwerk V ebenfalls durch Zahnräder in Verbindung steht, holt bei jedesmaliger Arretierung der Wage ein Gewicht hervor, das dann in den Becher B gleitet.

Die Bedienung des Apparates ist sehr einfach. Man belegt die Trommel mit photographischem Papier, bringt das Gefäß mit der Substanz auf die entsprechende Wagschale und stellt durch Auflegen von Gewichten usw. Gleichgewicht her, was durch Beobachtung des Zeigers der Wage mittels Spiegelablesung leicht zu konstatieren ist. Dann versetzt man die Trommel in Bewegung und schaltet die Lampen und den Strom ein.

Einen sehr schönen Erfolg erzielte v. Salviati (Braunschweig) mit seinem Heliographenschreiber, mit dem

er die Zeichen eines Heliographen, der auf dem Brocken installiert wurde, noch in einer Entfernung von 60 Kilometern aufzuschreiben vermochte. Die verwendete Selenzelle war sehr klein, hatte nur 4 qmm Oberfläche und war in der Empfangsstation im Brennpunkte eines Fernrohrs angebracht. Als Relais kam ein polarisiertes von 12000 Ohm Widerstand zur Verwendung, wie es früher in der drahtlosen Telegraphie benutzt wurde. Durch das Relais wurde ein Schreibapparat betätigt, so oft von der Ferne ein Lichtsignal eintraf und auf die Selenzelle fiel.

So sehen wir, daß wir der Selenzelle in Verbindung mit geeigneten Apparaten die verschiedensten Arbeiten anvertrauen können, die früher menschlicher Hilfskraft bedurften.

IX. Sortierung nach Farben.

Bei vielen Natur- und Kunstprodukten ist eine Sortierung nach Farben erforderlich. Zum automatischen Betrieb von Sortiermaschinen eignet sich am besten die Selenzelle. Die zu sortierenden Körper werden der Reihe nach in den Strahlengang einer konstanten Lichtquelle geführt, wo sie je nach ihrer Farbe mehr oder weniger Licht reflektieren. Die reflektierten Strahlen fallen auf eine Selenzelle und verursachen ihrer Lichtstärke entsprechende Änderungen der Leitfähigkeit des Selens bezw. der Stromstärke. Dadurch können verschiedene Kontakte geschlossen und die zu sortierenden Körper in die ihrer Farbe entsprechenden Fächer befördert werden.

A. Weigl (383) hat eine derartige Sortiermaschine gebaut, die sehr sicher funktioniert. Die Maschine hat folgende Einrichtung. Ein großer Verteilungstrichter versorgt eine größere Anzahl von Einzelgängen mit dem zu bearbeitenden Material. Aus dem Fülltrichter jedes Einzelganges werden die Körper einzeln in bestimmter Lage und zu bestimmter Zeit an das Meßfenster geschafft und dortselbst eine Zeitlang festgehalten. Auf das Meßfenster ist das Licht einer starken Lichtquelle dauernd konzentriert. Je nach Helligkeit und Farbe reflektiert der am Meßfenster festgehaltene Körper die ihn treffenden Strahlen der Lichtquelle stärker oder schwächer auf eine Selenzellenkombination.

Fig. 204 zeigt die Schaltung der einzelnen Apparate. E_1 ist eine starke Stromquelle, Z_1 und Z_2 sind zwei möglichst gleichartige Selenzellen, W_1 und W_2 zwei feste Widerstände, die so ausgeglichen sind, daß das Zeigergalvanometer R stromlos ist, wenn keine der Selenzellen belichtet wird. Sobald nun ein Körper an das Meßfenster gelangt, wird je nach

dessen Farbe mehr oder weniger Licht reflektiert und mittels eines Spiegels auf die Selenzelle Z_1 geworfen. Die momentan einsetzende Leitfähigkeitserhöhung dieser Zelle bewirkt, daß das Galvanometer R Strom erhält und sein Zeiger ausschlägt. Seine jeweilige Stellung gibt den Farbenwert des im Meßfenster befindlichen Körpers an. In dieser Stellung wird der Galvanometerzeiger auf die darunter befindliche Kontaktstelle K automatisch für kurze Zeit niedergedrückt, wodurch ein besonderer Stromkreis geschlossen und eine Sortierkapsel S betätigt wird. Diese Vorgänge spielen sich alle annähernd

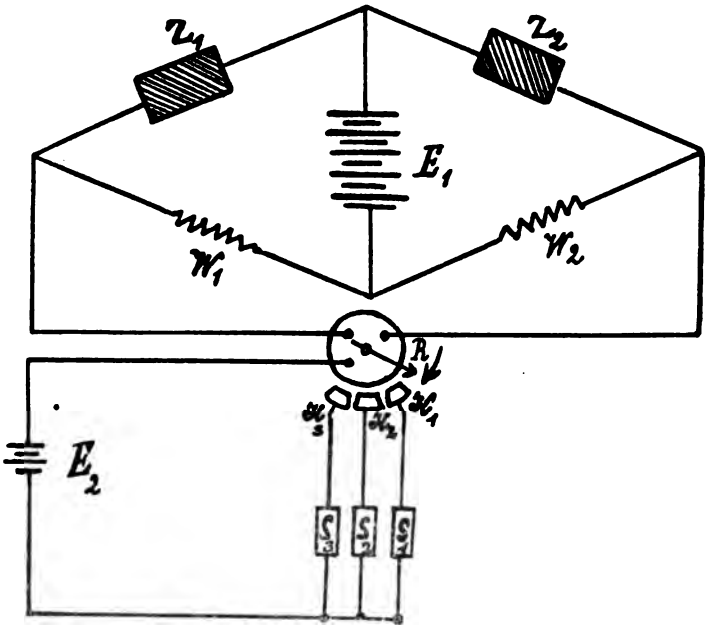


Fig. 204.

gleichzeitig ab. Im nächsten Augenblick wird der Galvanometerzeiger wieder freigelassen, gleichzeitig dreht sich der Spiegel und der von dem beleuchteten Körper reflektierte Lichtstrahl fällt nunmehr auf die 2. Zelle Z_2. Dadurch wird ein entgegengesetzt gerichteter Strom durch das Galvanometer R gesandt und dessen Zeiger somit sehr rasch auf Null zurückgeführt. Durch diese Kombination von 2 Zellen, die rasch hinter einander von ein und demselben Lichtstrahl getroffen werden, wird die Trägheit sehr wirksam bekämpft.

Die Zahl der Kontaktstellen richtet sich natürlich nach der Anzahl der Sortierfarben. Ist ein Kontakt geschlossen, so wird das der Farbe des Körpers entsprechende Auslaufrohr

der Sortierkapsel geöffnet und der Körper hineinbefördert. Die zur Beförderung der gleichfarbigen Körper bestimmten Auslaufrohre aller Einzelgänge vereinigen sich in je ein gemeinsames Sammelrohr, welches das sortierte Material in das für seine Farbe bestimmte Sammelgefäß leitet. Kaum hat der zu sortierende Körper das Meßfenster verlassen, so wird der nächste herangeführt, worauf sich der Arbeitsvorgang in der gleichen Weise wiederholt.

Der Sortierapparat muß natürlich für jede Art von Körpern eigens geeicht werden, damit man eine Sortierung nach Farben vornehmen kann.

X. Prüfung der Qualität von Lampen.

Bei der Beurteilung der Brauchbarkeit einer Lampentype kommt nicht bloß die Lichtstärke, sondern auch die Stetigkeit der Lichterzeugung in Betracht. Die Unruhe des Lichtes wirkt in einem geschlossenen Raum äußerst störend. Mit Hilfe einer Selenzelle kann man die Schwankungen in der Lichtstärke einer beliebigen Lichtquelle dauernd registrieren lassen. Man bildet einen Stromkreis aus einer Stromquelle, einer Selenzelle und einem registrierenden Galvanometer oder Oszillographen (S. 73). Da die von dem Instrument gelieferten Stromkurven die Lichtschwankungen ziemlich gut wiedergeben, kann die Einrichtung mit gutem Erfolg dazu benutzt werden, verschiedene Lampenarten bezüglich ihrer Brauchbarkeit zu vergleichen. Die Methode eignet sich besonders dazu, Bogenlampenkonstruktionen und das Elektrodenmaterial, die Kohlenstifte, auf ihre Qualität zu prüfen. Presser (274) hat bei derartigen Untersuchungen mittels Selenzellen recht günstige Resultate erzielt. Die in Fig. 205 gezeichneten Lichtkurven sind in dieser Weise gewonnen worden.

XI. Drahtlose Lichttelephonie.

Verbindet man eine Selenzelle mit einer Stromquelle und einem Telephon und bestrahlt die Zelle mit Licht von wechselnder Stärke, so vermögen alle Lichtschwankungen in der Selenzelle Stromschwankungen und im Telephon entsprechende Tonänderungen hervorzurufen. Es findet also auf diesem Wege eine Umsetzung von Licht- in Schallwellen statt. Wenn nun auch das umgekehrte Problem, die Umwandlung von Schallwellen in Lichtschwankungen möglich wäre, so hätten wir ein Mittel, Tonänderungen in Lichtschwan-

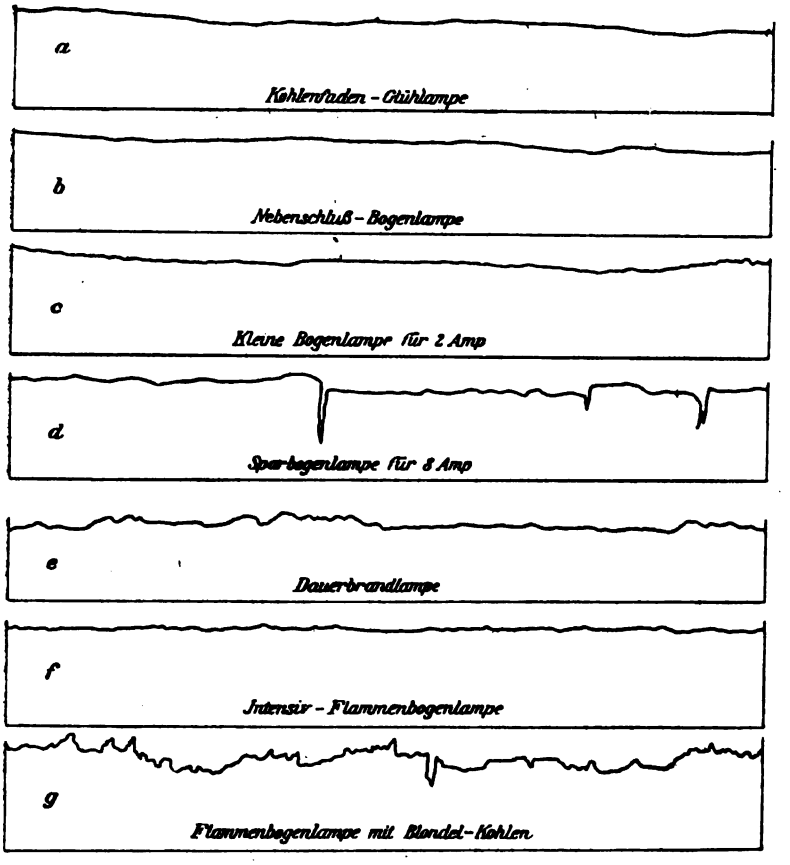


Fig. 205.

kungen und diese wieder in Tonänderungen umzusetzen; wir wären also imstande auf einem Lichtstrahl Gespräche in die Ferne zu senden. Tatsächlich besitzen wir geeignete Mittel, die es uns in einfacher Weise ermöglichen, durch Töne Intensitätsänderungen einer Lichtflamme zu erzeugen und zwar sind dies vor allem die manometrischen Flammen von König und der sprechende Flammenbogen von Th. Simon.

Leitet man Gas durch eine manometrische Kapsel, die seitlich eine Membran mit einem Trichter enthält, zu einem Spitzbrenner und spricht in den Trichter hinein, so übertragen sich die Schwingungen der Membran auf das Gas und die Flamme und bringen diese zu entsprechenden Intensitätsänderungen. Bei unmittelbarer Beobachtung kann man nur ein Erzittern der Flamme wahrnehmen. Betrachtet man aber die abwechselnd emporschießende und sich niederduckende Flamme in einem drehbaren Spiegel, so zeigt sie sich in ein-

zelne durch dunkle Zwischenräume getrennte Flammenbilder zerlegt und zwar entspricht, wie Fig. 206 zeigt, jedem Vokal und Konsonanten ein ganz bestimmtes Flammenbild. Solange man nicht in den Trichter spricht, brennt die Flamme ruhig, was in dem Spiegel durch einen ununterbrochenen Lichtstreifen zum Ausdruck kommt. Es leuchtet ohne weiteres ein, daß die während eines Gespräches entstehenden Flammenbilder auf eine Selenzelle in entsprechender Weise einzuwirken und ein damit verbundenes Telephon zu beeinflussen vermögen.

Eine einfache Vorrichtung, mit der man die Übertragung von Gesprächen ohne Drahtleitung demonstrieren kann, ist

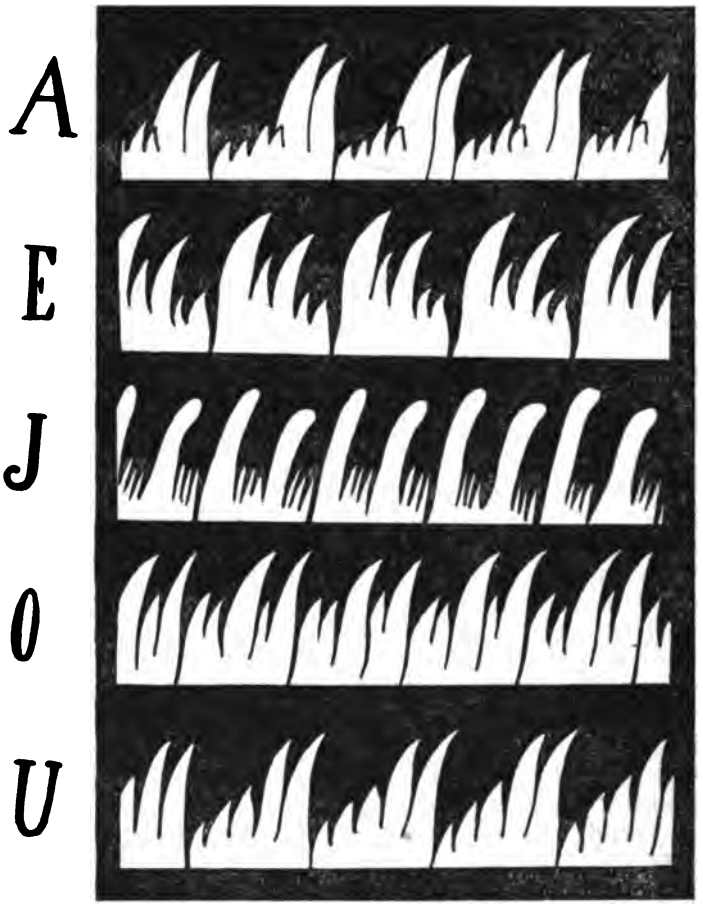


Fig 206.

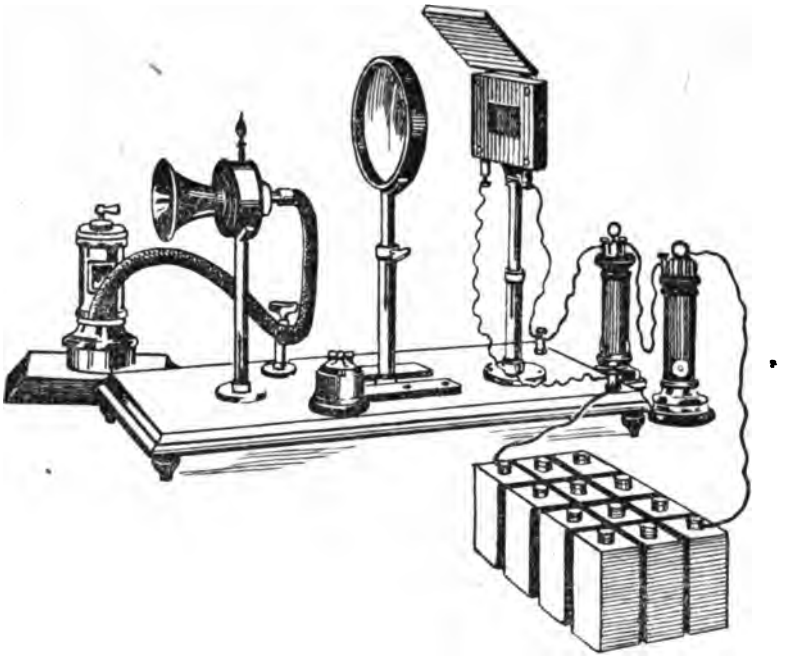


Fig. 207.

in Fig. 207 abgebildet. Die Sendestation besteht aus einem Acetylenentwickler, der durch einen dicken etwa 30 cm langen Gummischlauch mit einer manometrischen Kapsel verbunden ist; letztere enthält seitlich eine Membran und einen Trichter zum Hineinsprechen. Das Gas strömt aus dem Entwickler durch den Schlauch und die Manometerkapsel zu einem Spitzbrenner, der eine etwa 1,5 cm hohe Spitzflamme liefert. Spricht man in den Trichter gegen die Membran, so übertragen sich die Schwingungen der Membran auf das Gas und die Spitzflamme, wodurch das Acetylenlicht zu Intensitätsänderungen gebracht wird, die den zu übertragenden Schallwellen genau entsprechen. Die undulierenden Lichtstrahlen werden mittels einer Linse nach der Empfangsstation gesandt. Diese besteht aus einer Selenzelle von etwa 100 000 Ohm, einem Telephon von hohem Widerstand und einer Batterie von mindestens 50 Volt, die hintereinander geschaltet sind. Sobald die von der Sendestation kommenden undulierenden Lichtstrahlen die Selenzelle treffen, wird der die Zelle durchfließende Strom in entsprechende Schwankungen versetzt und man hört am Telephon alle gegen die Membran gesprochenen Worte deutlich.

Sollen Gespräche mittels der Lichttelephonie auf weitere Entfernungen übermittelt werden, so verwendet man als Lichtquelle eine Bogenlampe, deren Strahlen mittels eines drehbaren Parabolspiegels nach der Empfangsstation gesandt werden und nimmt die Erscheinung des sprechenden Flammenbogens, eine geniale Erfindung von Th. Simon (Göttingen), zu Hilfe.

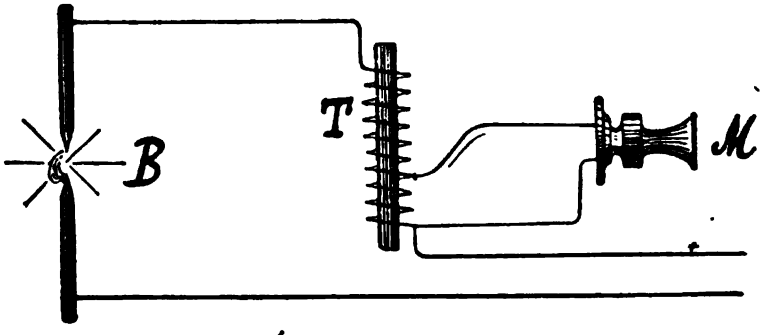


Fig. 208.

Die Versuchsanordnung, mittels der man den sprechenden Flammenbogen zeigen kann, ist aus Fig. 208 zu ersehen. Man bildet einen Stromkreis aus der Stromquelle, der Bogenlampe B und dem Bogenlichttransformator T. Letzterer besteht aus einer Drahtrolle, von der eine geeignete Abzweigung nach einem Mikrophon M führt. Das Mikrophon besitzt also keine besondere Batterie, sondern erhält einen Teilstrom der Bogenlichtleitung. Spricht man gegen das Mikrophon, so entstehen in der Abzweigung periodische Schwankungen der Stromstärke; diese lagern sich in dem damit verbundenen Hauptstromkreis über den Hauptstrom und bringen den außerordentlich empfindlichen Flammenbogen zu entsprechenden Lichtintensitätsänderungen und zur Wiedergabe der in das Telephon gesprochenen Worte. Werden Gesänge oder Musikstücke in der Nähe des Mikrophons aufgeführt und befindet sich die Bogenlampe in einem großen Saale, so ist die Wirkung so deutlich, daß jeder Anwesende im Saale die Vorträge hören kann.

Fig. 209 enthält das Schaltungsschema für die Lichttelephonie. Die im linken Teile gezeichnete Sendestation entspricht genau der Versuchsanordnung für die sprechende Bogenlampe. Nur liegt hier der Flammenbogen im Brennpunkte eines Parabolspiegels, wodurch die undulierenden Lichtstrahlen parallel gemacht und nach der Empfangsstation gesendet werden.

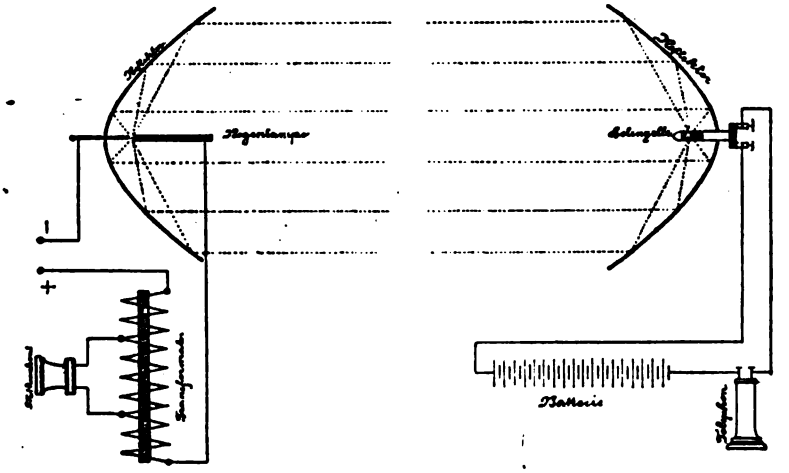


Fig. 209.

Die Empfangsstation ist rechts abgebildet. In dem Brennpunkte eines drehbaren Parabolspiegels befindet sich eine Selenzelle, die mit einem Telephon und einer Batterie verbunden ist. Die von der Sendestation ankommenden indulierenden Lichtstrahlen werden im Brennpunkte des Parabolspiegels vereinigt, wie es aus der Figur zu ersehen ist, und verursachen entsprechende Änderungen des Selenwiderstandes bezw. der Stromstärke in der Leitung, so daß man im Telephon die in das Mikrophon gesprochenen Worte hören kann. Fig. 210 zeigt die Einrichtung einer Sendestation, Fig. 211 diejenige einer Empfangsstation. Bei der Sendestation

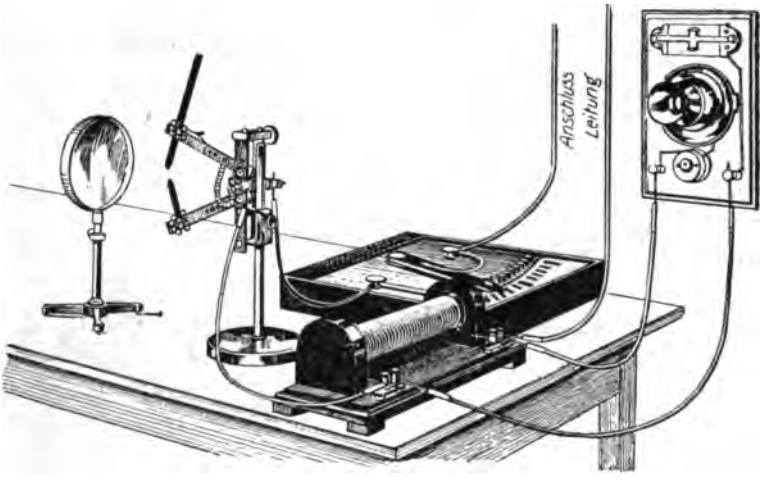


Fig. 210.

ist in den Hauptstromkreis ein Widerstand eingeschaltet zur Regulierung des Bogenlichtes. Auch in der Abzweigung liegt ein regulierbarer Widerstand, damit bei hoher Stromstärke das Mikrophon vor zu hoher Strombelastung durch Einschalten von Widerstand geschützt werden kann.

Die Versuche gelingen bei Tageslicht, ja sogar Sonnenschein fast so gut als bei Nacht. Man muß nur verhindern, daß die Sonne direkt auf den Parabolspiegel der Empfangsstation auffällt. Die Verminderung des Zellenwiderstandes durch das Tageslicht ist nicht von wesentlicher Bedeutung, da es hier ja lediglich auf die raschen Schwankungen des Bogenlichtes ankommt.

Eine Verbesserung der Wirkung des sprechenden Flammenbogens wird durch die in Fig. 212 dargestellte Schaltung erreicht. Es wird durch dieselbe verhindert, daß die durch das Mikrophon verursachten Stromschwankungen den ganzen Stromkreis einschließlich Batterie durchlaufen, wodurch sie eine wesentliche Schwächung erfahren. Parallel zur Bogenlampe wird ein Kondensator mit einer Kapazität von ca. 5 Mikrofarad gelegt und in den Hauptstromkreis selbst eine Drosselspule (Selbstinduktionsrolle) geschaltet. Für den von der Batterie kommenden Gleichstrom ist die Drosselspule ohne weiteres passierbar, der Nebenschluß mit dem Kondensator aber gesperrt. Für die beim Sprechen in das Mikrophon im Transformator entstehenden Wechselströme aber ist der Kon-

Fig. 211.

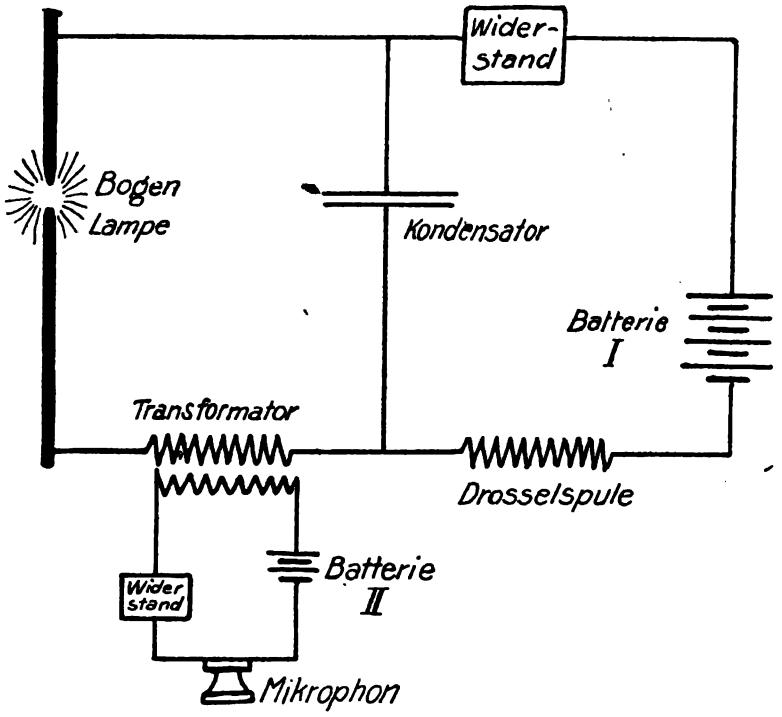


Fig. 212.

densator nur ein sehr kleiner Widerstand, die Drosselspule dagegen ein unendlich großer. Die Mikrophonströme werden daher nicht über die Batterie, sondern über den Kondensator fast ungeschwächt auf die Bogenlampe übertragen. Auf diesem Wege wird eine ganz wesentliche Verbesserung der Deutlichkeit und Lautstärke erzielt. Das Mikrophon ist hier nicht parallel zum Hauptstromkreis geschaltet; es liegt in einem eigenen Stromkreis, der gebildet ist aus einer kleinen Batterie II, der Primärspule des Transformators, dem Mikrophon und einem Vorschaltwiderstand.

Die vom Lampenstrom durchflossene Spule hat mehr Windungen als die primäre Mikrophonspule. Haupterfordernis zur Erzielung starker Wirkungen ist die Verwendung einer Bogenlampe mit möglichst hoher Betriebsstromstärke und eines möglichst langen Flammenbogens, sowie die Benützung eines Körnermikrophons von hohem Widerstand (2—5 Ohm), das mit größerer Stromstärke betrieben werden kann. Das Telephon der Empfangsstation muß besonders empfindlich sein; der Kern wird am besten mit 0,33 mm dickem Silberdraht bewickelt, damit der innere Widerstand dem der Selenzelle näher kommt. Die Telephonströme können mittels des Telephonrelais (S. 238) verstärkt werden.

Fig. 213.

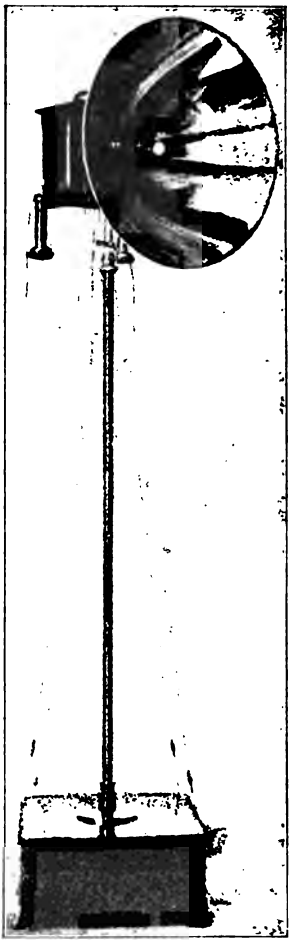


Fig. 214.

Was schließlich die Entstehung der Schallschwingungen im Flammenbogen betrifft, so sei darauf hingewiesen, daß beim Übergang des elektrischen Stromes zwischen den zwei Kohlenenden diese sowohl als auch die dazwischen befindlichen Gase ins Glühen kommen. Die übergelagerten Stromschwingungen aber veranlassen analoge Schwankungen des Volumens der den Flammenbogen bildenden leitenden Gase.

Simon (163, 164) war der erste, der die lichttelephonische Übertragung von Gesprächen auf weitere Entfernungen unter Anwendung des sprechenden Flammenbogens zeigte. Um den weiteren Ausbau der Lichttelephonie hat sich Ruhmer (153, 161, 172) sehr bemüht; ihm ist es gelungen, auf 15 km

Gespräche zu übertragen. Fig. 213 zeigt den 60 cm-Scheinwerfer, den Ruhmer als Sendeapparat benutzte; der Empfangsapparat ist in Fig. 214 abgebildet.

Die Lichttelegraphie hat vor der Funkentelegraphie den Vorzug, daß Unbefugte die Mitteilungen nicht abfangen können, hat aber den Nachteil, daß die beiden Stationen einander sichtbar sein müssen, weshalb der lichttelegraphischen Übertragung durch die örtliche Beschaffenheit Grenzen gezogen sind.

Über die drahtlose Lichttelegraphie vergl. S. 338.

XII. Photographie der Sprache, selbsttätige Aufzeichnung von Gesprächen und spätere telephonische Wiedergabe derselben; der sprechende Film.

Die Erscheinung des sprechenden Flammenbogens brachte Th. Simon (Wied. Anm. 64, 233, 1898) auf den Gedanken, die dabei auftretenden Lichtschwankungen photographisch auf bewegtem Bromsilberpapier zu registrieren. Der Versuch führte zu einem negativen Resultat. Dagegen teilt uns Ruhmer (157, 177), der die Versuche Simons wiederholte, sehr interessante Resultate mit. Nach ihm gibt uns die Lichttelephonie ein Mittel an die Hand, Gespräche genau aufzuzeichnen und nachher zu beliebiger Zeit telephonisch wiederzugeben. Die Anordnung der Apparate ist aus Fig. 215 zu ersehen.

M ist das Mikrophon, T der Lichttransformator, B die Bogenlampe und A die Stromquelle. Die Wirkungsweise dieser Anordnung wurde bereits Seite 296 behandelt. Spricht oder singt man vor dem Mikrophon, so gerät der Lichtbogen B in Schwankungen, die man mit dem bloßen Auge nicht sehen, aber auf einem photographischen Film sichtbar machen kann. Zu diesem Zwecke befindet sich bei F in einem lichtdichten Kasten ein Film, der von einer Rolle auf eine andere aufgewickelt wird. Vor dem Film ist eine Zylinderlinse L mit der Achse in horizontaler Richtung angebracht. Diese Linse erzeugt, nachdem sie auf die Kohlenspitzen des Flammenbogens eingestellt ist, auf dem Film eine helle, äußerst feine Lichtlinie in der ganzen Breite des Films; dabei wird das Licht so auf den Film konzentriert, daß die Brennlinie eben den Film trifft. Nach Beendigung der Aufnahme wird der Film entwickelt und fixiert. Fig. 216 zeigt das Bild des unbeeinflußten Flammenbogens bei Gleichstrom; dagegen

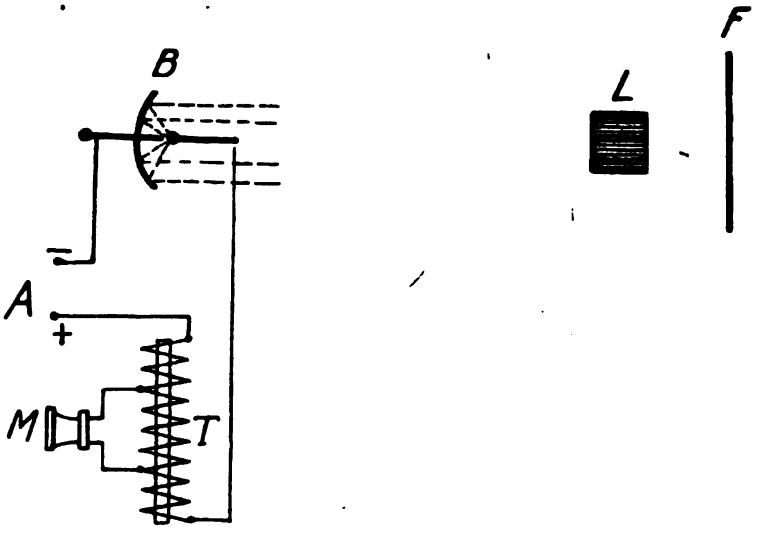


Fig. 215.

veranschaulicht Fig. 217 einen Teil eines „lichtbesprochenen" Films. Der Apparat, mit dem der Film durch einen Motor in Bewegung gesetzt wird, ist in Fig. 218 dargestellt.

Auf dem lichtbesprochenen Film sind die Lichtschwankungen deutlich sichtbar; jeder Ton hat bestimmte Gruppierungen von Linien hervorgerufen. Der Film gibt uns ein getreues Bild des vor dem Mikrophon geführten Gespräches; wir haben hier eine Photographie der Sprache vor uns.

Durch die in Fig. 219 abgebildete Anordnung kann das Gespräch nach beliebiger Zeit telephonisch wiedergegeben werden. Man benutzt die zur Herstellung des Films benötigten Apparate, die Bogenlampe B, die Linse L und den Film F und zwar genau in derselben Anordnung, nur wird hier die Bogenlampe nicht zum Sprechen, sondern nur zur Beleuchtung verwendet. Hinter dem Film befindet sich eine hochempfindliche Selenzelle S, die mit einer Stromquelle A_2 und einem Telephon T verbunden ist. Rotiert der Film mit der gleichen Geschwindigkeit wie bei der Aufnahme, so entstehen in der Selenzelle Stromschwankungen, die den Tönungen des Films genau entsprechen. Wenn das Licht durch eine hellere Stelle des Films geht, fließt infolge der Leitfähigkeitsvergrößerung des Selens ein stärkerer Strom durch das Telephon, ein schwächerer dagegen, wenn das Licht durch Stellen mit dunklerer Tönung geht. Die Ströme im Telephon entsprechen in ihrer Stärke fortlaufend den Tönungen des Bildes auf dem Film, so daß man im Telephon, während der Film abläuft,

Fig. 216.

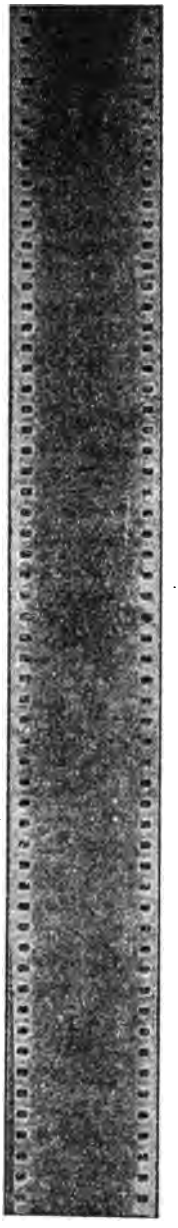


Fig. 217.

Fig. 218.

genau die Töne bezw. Worte hören kann, die seinerzeit in das Mikrophon gesprochen wurden.

So interessant diese Ausführungen auch sind, so muß hier doch bemerkt werden, daß die Erscheinung für technische Zwecke noch in keiner Weise ausgenützt wurde. Offenbar ist der Effekt nicht deutlich genug und die Einführung in die Praxis mit wesentlichen Schwierigkeiten verbunden. Darauf

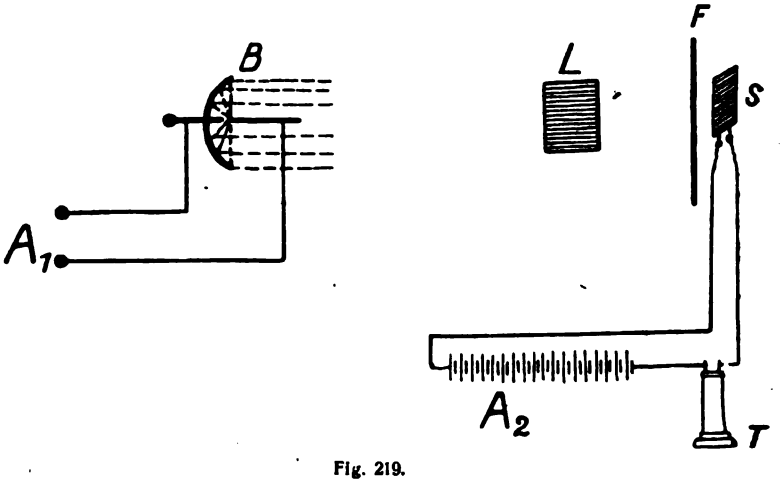


Fig. 219.

deutet auch die Tatsache hin, daß selbst Ruhmer über die Erscheinung und ihre technische Verwendung später keinerlei Mitteilungen mehr brachte.

Flowers (479) hat im Verein mit der Physiologischen Gesellschaft in Newyork und der Underwood Typewriter Co. eine Schreibmaschine gebaut, die zum unmittelbaren Niederschreiben gesprochener Laute dient. Die Worte werden in ein hochempfindliches Mikrophon gesprochen, wodurch Stromschwankungen entstehen, die durch ein Gasentladungsrelais (S. 238) entsprechend verstärkt werden können. Die beim Sprechen entstehenden Stromänderungen gehen durch die Primärwickelung eines Transformators, in dessen sekundärem Stromkreis eine Anzahl elektrischer Resonanzkreise liegen, die auf die verschiedensten Schwingungszahlen zwischen 100 und 2500 sekundlich abgestimmt sind. Jeder Resonanzkreis besteht (Fig. 220) aus einem Elektromagnet, einem Anker und einem Kondensator. Stimmt man Elektromagnet und Kondensator genau auf einander ab, so

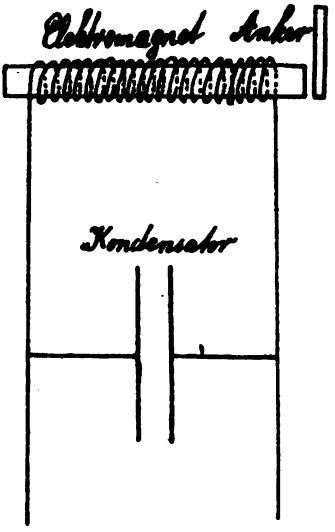


Fig. 220.

läßt es sich erreichen, daß jeder Schwingungskreis nur bei einer ganz bestimmten Schwingungszahl in Resonanz gerät. Die beim Sprechen im Mikrophon entstehenden und auf den Sekundärkreis übergetragenen Stromschwankungen durchfließen sämtliche Resonanzkreise, da diese parallel an die Sekundärleitung angeschlossen sind, erregen aber immer nur den ihrer Schwingungszahl entsprechenden zur Resonanz. Dadurch wird der zugehörige Elektromagnet und der gegen-

überliegende Anker beeinflußt und ein auf letzterem sitzendes Spiegelchen in periodische Schwingungen versetzt. Auf das Spiegelchen fällt ein Lichtstrahl, der nach dem Rande einer Selenzelle zurückgeworfen wird. Die Selenzelle bildet mit einer Batterie und einem Farbschreiber einen Stromkreis. Sobald ein Laut ertönt, wird ein Spiegelchen in Schwingungen versetzt und die Selenzelle durch die Lichtschwingungen beeinflußt. Dadurch soll erreicht werden, daß der Farbschreiber auf dem Papierstreifen Wellenzüge wiedergibt, die für den betreffenden Laut oder Buchstaben charakteristisch sind. Werden Worte gesprochen, so geraten die zugehörigen Spiegelchen der Reihe nach rasch hintereinander in Schwingungen, in der Selenzelle entstehen entsprechende Stromschwankungen und auf dem Papierstreifen zeigen sich Wellenzüge von verschiedener Amplitude, aus deren Form man die gesprochenen Worte erkennt. Der Apparat soll in den Dienst der vergleichenden Sprachforschung gestellt werden.

In ähnlicher Weise suchte man Vorrichtungen zur Wiedergabe der Sprache beim Lichtspiel (Kinematograph) zu bauen, indem die Schallschwingungen in Lichtschwankungen umgesetzt und die Aufnahme der Gegenstände und Töne auf dem gleichen Filmstreifen vorgenommen wurde. Die Registrierung der Schallwellen erfolgte gewöhnlich mit Spiegelinstrumenten, deren Spiegelchen den Schallwellen genau entsprechende Schwingungen ausführten, einen auf sie treffenden Lichtstrahl auf eine photographische

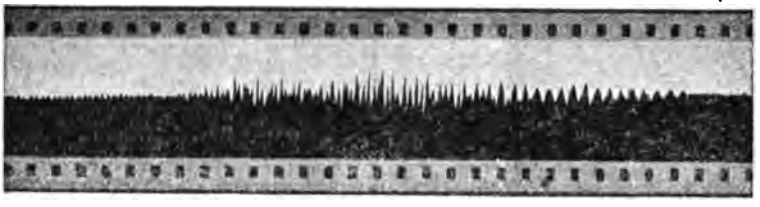


Fig 221

Schicht reflektierten und auf dieser linien- oder flächenförmige Aufzeichnungen vornahmen. In Fig. 221 ist ein Stück eines derartigen Films wiedergegeben. Führt man den Film zwischen einer Lichtquelle und einer Selenzelle hindurch, so wird die Selenzelle von Licht wechselnder Stärke getroffen; dadurch entstehen in dem zugehörigen Stromkreis Stromschwankungen, die sich auf einen Lautgeber übertragen. Die Wirkung muß durch Anwendung des Telephonrelais verstärkt werden. Versuche mit dem sprechenden Film werden zur Zeit vorgenommen.

XIII. Blindenlesemaschinen und Lichthörer.

Da wir die meisten Vorstellungen von der Außenwelt dem Auge verdanken, ist das Augenlicht als der wichtigste Sinn und das Fehlen desselben wohl als der schwerste Verlust anzusehen, der einen Menschen treffen kann. Der Blinde wäre zur Hilflosigkeit oder wenigstens zur Ausführung geistloser mechanischer Arbeiten verurteilt, wenn man ihm nicht durch schulmäßigen Unterricht neue Bahnen öffnen würde. Es muß ihm der Weg gezeigt werden, wie der fehlende Sinn durch die noch vorhandenen Sinne ersetzt werden kann. Da als Ersatz des Auges der Tastsinn und das Gehör in Betracht kommen, ist auf eine möglich feine Durchbildung dieser Sinne besonderes Gewicht zu legen. Tatsächlich können wir uns bei Beobachtung eines Blinden davon überzeugen, daß er in der Ausbildung des Tastsinnes und des Gehöres einen hohen Grad von Vollkommenheit erreicht hat, weit höher als der sehende Mensch.

Um die geistigen Bedürfnisse der Blinden zu fördern, hat man die Buchstaben erhaben dargestellt, so daß sie der Blinde durch Abtasten erkennen kann; man hat jedoch bald erkannt, daß dem Blinden die Arbeit des Lesens wesentlich erleichtert wird und das Lesen weit schneller vor sich geht, wenn man statt der Reliefbuchstaben ein aus einzelnen erhabenen Punkten bestehendes Schriftsystem anwendet. Seit 1879 ist als Weltschrift für Blinde in allen Kulturstaaten die Braillesche Punktschrift eingeführt, bei der sämtliche Schriftzeichen durch Gruppen von erhabenen Punkten dargestellt werden.

An ein gewaltiges Problem ist man in neuerer Zeit herangetreten, indem man dem Blinden die gewöhnliche Druckschrift durch eine maschinelle Vorrichtung zum Bewußtsein zu bringen sucht; man will den Blinden befähigen, Zeitungen und Bücher in der gewöhnlichen Schrift zu lesen. Die Verwirklichung dieser Idee ist auf zweifache Weise denkbar, nämlich durch Umsetzen der Schriftzeichen in eine erhabene Punktschrift oder auch in Töne; im ersteren Falle würde dem Blinden die Schrift durch das Gefühl, im letzteren durch das Gehör übermittelt. Wie lassen sich nun die Buchstaben, die beständigen Wechsel von Weiß und Schwarz, von Hell und Dunkel, in Arbeitsleistungen umsetzen? Dazu gehört unbedingt eine Vorrichtung oder Substanz, die gestattet, Lichtenergie in eine andere Energieform überzuführen. Verwirklicht werden sollte die Idee natürlich wieder mit der Selenzelle.

Die ersten Versuche, die hauptsächlich von englischer und amerikanischer Seite ausgingen, bezweckten das Gehör zur sinnlichen Wahrnehmung der Schriftzeichen heranzuziehen. Bildet man einen Stromkreis aus einer Stromquelle, einem Telephon und einer Selenzelle und belichtet letztere mit Licht von wechselnder Stärke, so vermögen alle Änderungen der Lichtstärke entsprechende Stromschwankungen hervorzurufen, so daß das Telephon ertönt. Es läßt sich auf diesem Wege Licht in Elektrizität und diese wieder in Schall umsetzen. Umgekehrt kann man aus dem Wesen der Telephongeräusche wieder auf die Art der Beleuchtung schließen.

Der Engländer Fournier d'Albe (393) baute vor ungefähr vier Jahren einen Apparat, der Licht in Schall umsetzen und den Blinden befähigen soll, Dasein und Intensität des Lichtes durch das Ohr wahrzunehmen. Er nannte den Apparat deshalb Optophon (Lichttöner, Lichthörer). Fig. 222 zeigt uns die Anordnung der einzelnen Teile. In der Brücke liegt die Batterie B, in den einzelnen Zweigen befinden sich die Selenzellen Se_1 und Se_2, sowie die variablen Graphitwider-

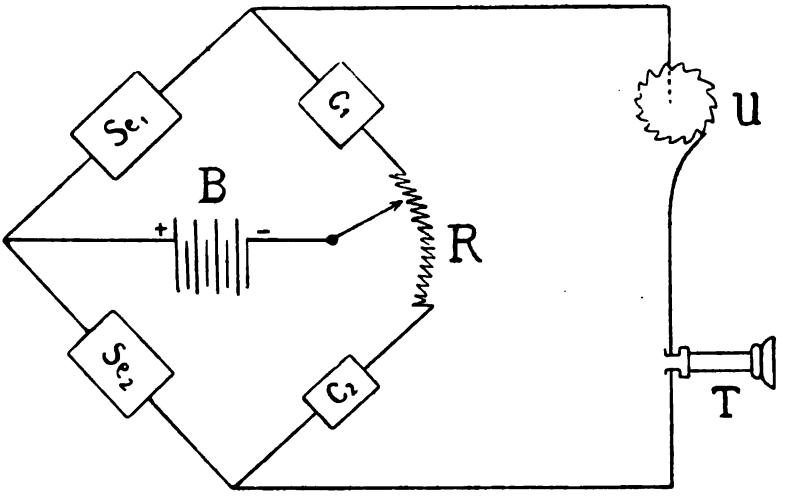


Fig. 222.

stände C_1 und C_2. Durch entsprechende Einstellung des Regulierwiderstandes R kann man es ermöglichen, daß kein Strom durch das Telephon T fließt, wenn beide Zellen im Dunkeln liegen. Fällt Licht auf die eine der Selenzellen, während die andere verdunkelt bleibt, so vernimmt man ein momentanes Summen im Telephon, und zwar um so deutlicher, je größer die Stärke der auffallenden Strahlen war. Da man in einem

Telephon einen konstanten Strom nicht hört, wird der durch das Telephon gehende Strom mittels des Uhrwerks U etwa zehnmal in der Sekunde unterbrochen und dadurch hörbar gemacht. Liegen also beide Zellen im Dunkeln, so ist das Telephon stromlos und man hört keinen Ton. Bestrahlt man aber die eine der Zellen, so fließt ein Strom durch das Telephon und man hört während der Dauer der Belichtung einen Ton; dieser verschwindet erst wieder, wenn die Selenzelle verdunkelt wird.

Mit einem solchen Apparat kann der Blinde feststellen, ob es hell oder dunkel ist, wann es Tag und Nacht wird. Sucht der Blinde mit der Selenzelle das Zimmer bei Tag ab, so kann er die Umrisse der Fenster erkennen, er kann die Anwesenheit von Gegenständen und Personen feststellen, wenn deren Farbe oder Kleidung sich scharf von dem Hintergrund abhebt, er kann durch die Tonänderungen die Zahl der Personen feststellen (S. 254), die z. B. an einem Fenster vorbeigehen, er kann bei Nacht die Richtung nach der brennenden Lampe finden u. a.

Fournier d'Albe hat noch eine weitere Vorrichtung ersonnen, mit der er die gewöhnliche Schrift dem Blinden zum Bewußtsein bringen wollte. Fig. 223 zeigt uns die Versuchsanordnung. W ist eine weiße Wand oder ein Schirm, von dem das Licht mittels der Linse L auf die Selentafel S fällt. Von letzterer führt die elektrische Leitung um den Elektromagnet E zur Batterie B, von da zum Telephon T und über die Widerstände W_1 und W_2 sowie den Zeiger Z zurück nach S. Der Zeiger Z ist drehbar und schaltet je nach seiner Stellung bei W_2 mehr oder weniger Widerstand ein. Die Zeigerstellung wird durch den Elektromagnet E beeinflußt, der je nach der Belichtung der Selentafel mehr oder weniger durch

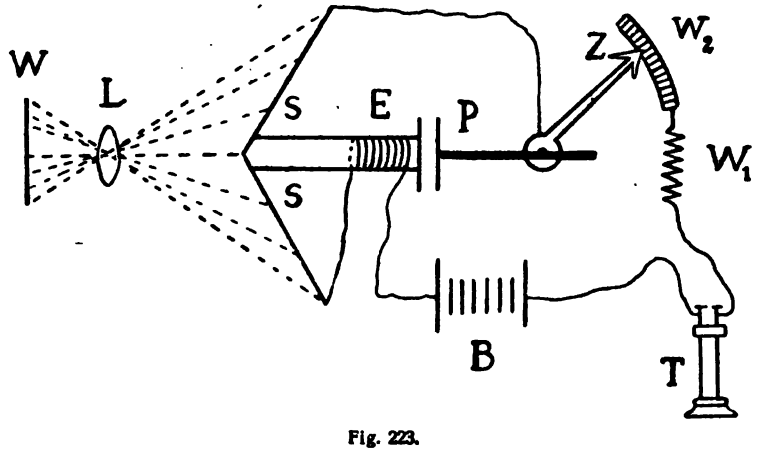


Fig. 223.

den Leitungsstrom erregt wird und dementsprechend die mit dem Zeiger verbundene Metallplatte P anzieht. Die Anbringung des Zeigers hat den Wert, die durch die Lichtdifferenzen hervorgerufenen Stromschwankungen im Stromkreis durch entsprechende mechanische Änderungen des Widerstandes W_2 noch zu verstärken. Die Selentafel besteht nicht aus einer, sondern aus sieben Selenzellen, die ungefähr die in Fig. 224 abgebildete Anordnung haben. Dabei ist jede Selenzelle durch die um den Elektromagnet E führende Leitung mit einem eigenen Lautgeber im Telephon verbunden.

Dieses Optophon ist also gleichsam aus sieben Optophonen der vorigen Art, das nur einen einzigen Lautgeber enthält, zusammengesetzt. Zur Verstärkung der Telephonströme wurden Telephonrelais (S. 238) benutzt. Da das Telephonhörrohr mittels eines Bügels vor das Ohr gehängt werden kann, hat der Hörende die Hände zur Bedienung des Apparates frei.

Wird nun beim Schirme W (Fig. 223) ein leeres weißes Papier vorbeigeführt, so verbinden sich infolge der Wirkung der 7 Selenzellen 7 Töne zu einer lauten Dissonanz im Telephon, während bei schwarzem Papier kein Ton zu hören ist. Bewegt man aber verschiedenartige Buchstaben (Fig. 224 und 225), die durch die Linse L entsprechend vergrößert werden, bei W vorbei, so ist der Gesamtakkord der durch die Zellen hervorgebrachten Töne je nach der Art der Buchstaben anders gefärbt.

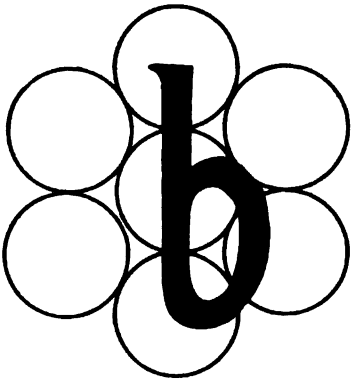


Fig. 224.

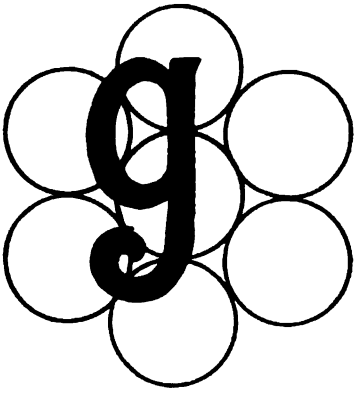


Fig. 225.

Der Lichthörer von Fournier d'Albe hat nach mehrfachen Änderungen die in Fig. 226 angegebene Form erhalten. Vor einer kräftigen Nernstlampe N rotiert eine durchlochte Scheibe S, die mehrere Lochkreise enthält, so daß von der Scheibe in gewissen Zeitabschnitten Lichtimpulse ausgehen. Die Lichtstrahlen werden von einem Prisma reflektiert und mittels des

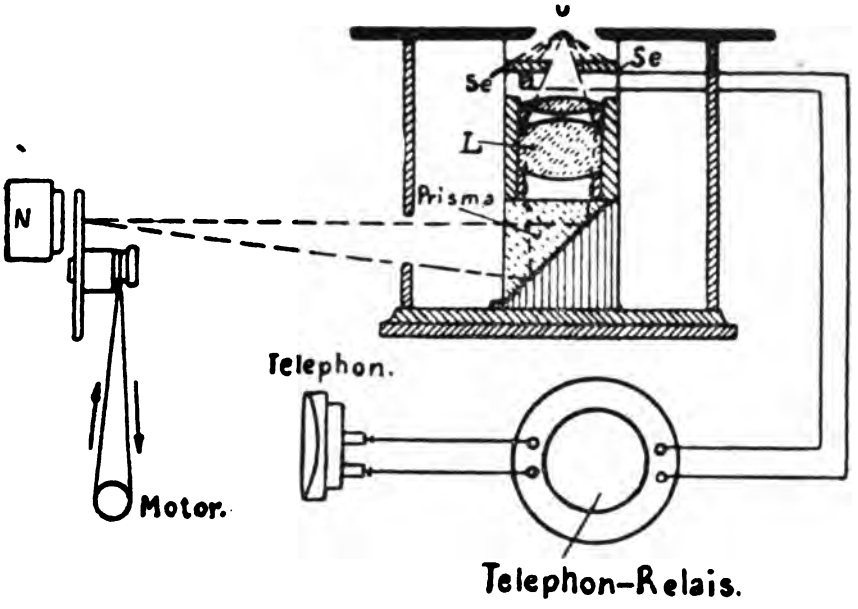


Fig. 226.

Linse L auf den Spalt O der Lesefläche geworfen. Zieht man über den Spalt ein Blatt Papier hinweg, so wird die darunter angebrachte Selenzellenanordnung Se von dem zurückgestrahlten Lichte intermittierend beleuchtet. Ist das Blatt mit einer Druckschrift versehen, so wird das Selenzellensystem bald belichtet, bald beschattet, je nachdem die vom Licht getroffene Papierfläche weiß oder schwarz ist. Mit jeder Selenzelle ist zur Verstärkung der Wirkung ein Telephonrelais verbunden und an letzteres ein Telephon angeschlossen.

Der Amerikaner Brown in Jowa City (492) suchte das Optophon dadurch zu verbessern, daß er ganz winzige Selenpräparate, Selenkristalle, in großer Anzahl verwendete. Die Versuchsanordnung des Brownschen „Kristallphonoptikons" ist aus Fig. 227 ersichtlich. Durch eine optische Vorrichtung wird auf dem Papierblatt ein schmaler heller Streifen 1 erzeugt und der Apparat längst der Druckzeile verschoben. Die Linse 2 wirft von dem Streifen ein Bild auf die gegenüberliegende Selenkristallanordnung 3, von der nur ein Teil gezeichnet ist. Jeder Selenkristall liegt in einem eigenen Zweig der Wheatstoneschen Brückenschaltung. In der einen Verzweigung befinden sich die Widerstände 7 und 5, in der anderen der Widerstand 8 und je ein Selenkristall 3. Die Brücke führt

von 4 über je ein Telephon 15 und einen Unterbrecher 12 nach dem Abzweigpunkt 9; bei 6 liegt die Batterie. Jedes Telephon gibt je nach der Zahl der Unterbrechungen einen verschiedenen Ton. Gehen nun die Schatten der Buchstabenbilder beim Verschieben des Apparates der Reihe nach durch den Spalt, so treten Klangänderungen im Telephon auf.

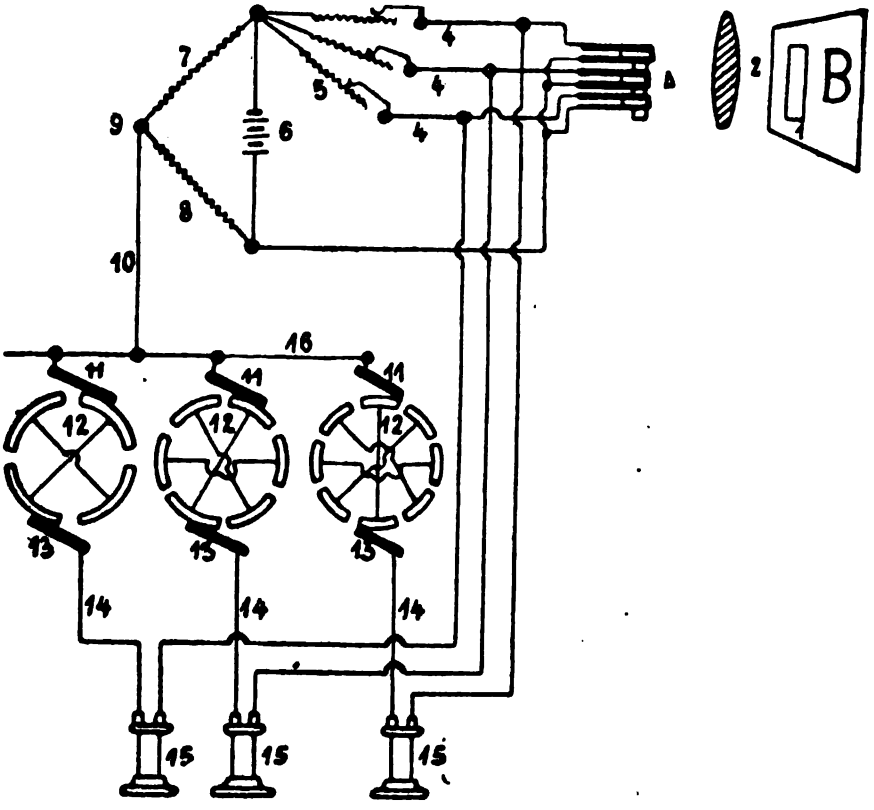


Fig. 227.

P. Lazarus hat am 23. Februar 1916 in der Berliner medizinischen Gesellschaft einen Lichthörer ähnlicher Konstruktion vorgeführt, durch den sich ein Kriegsblinder in einem Saale zu orientieren vermochte.

Der hauptsächlichste Nachteil all dieser Optophone beruht darin, daß die zahlreichen Tonverbindungen, die dabei auftreten, selbst nach langer Übung kaum von einem recht gut musikalisch veranlagten Gehör richtig erfaßt werden können. Denn jede Zelle verursacht beim Vorbeigleiten eines Buchstabenbildes zahlreiche Tonvariationen, und da sich noch

außerdem die Tonänderungen von ca. 7 Lautgebern in einem einzigen Hörrohr vereinigen, erhält man unfaßbare Tongeräusche. Ferner sind zur Verstärkung der schwachen Ströme sieben teuere und umfangreiche Telephonrelais nötig, so daß ein derartiger Lichthörer ein kostspieliges Kunstwerk würde. Was nun die von Brown vorgeschlagene Anwendung winziger Selenpräparate betrifft, so ist darauf zu verweisen, daß die in dem großen spezifischen Widerstand des Selens liegende Schwierigkeit sich immer mehr bemerkbar macht, je kleiner die Abmessungen der Selenzellen sind. So schreibt Korn (486) zu der Mitteilung, daß die Blinden unter Anwendung von Telephonrelais mit dem Brownschen Apparat bereits gelernt hätten, die Klangfarbe von mehreren etwas vergrößerten Buchstaben zu unterscheiden: „Diese Nachricht ist natürlich mit Vorsicht aufzunehmen, solange nicht genaue, wissenschaftlich begründete weitere Nachrichten vorliegen. Man kann sehr wohl daran denken, an Stelle der üblichen Abmessungen der Selenzellen Selenpräparate kleinerer Größen zu verwenden, man muß aber bedenken, daß die in dem großen spezifischen Widerstande des Selens liegende Schwierigkeit sich immer mehr bemerkbar macht, je kleiner die Abmessungen der Selenpräparate sind, und wenn auch die zur Zeit zur Verfügung stehenden Telephonrelais ganz ausgezeichnete Verstärkungen zu leisten imstande sind, so ist doch in keinem Falle daran zu denken, daß auf diesem Wege d. h. unter Verwendung von Selenstäbchen ein praktischer Erfolg erzielt werden kann. Es ist anzunehmen, daß Brown durch Verwendung besonders guter Telephonrelais die Untersuchungen Fournier d'Albes verfeinert hat, daß aber einige allzu optimistische Berichterstatter in einer Verkleinerung der Selenpräparate die praktische Lösung des Problems zu sehen glaubten." Ich möchte hier noch auf einen sehr wichtigen Punkt hinweisen. Infolge der Inkonstanz der Selenzellen, d. h. der im Laufe der Zeit sich vollziehenden Änderungen des Dunkelwiderstandes und der Lichtempfindlichkeit ändern die Grundströme in den Selenzellen allmählich ihre Stärke, selbst wenn die Lichteindrücke dieselben bleiben. Besteht nun ein Apparat aus vielen Selenzellen, die gewöhnlich verschiedenartigen Änderungen unterworfen sind, so entstehen mit der Zeit immer neue Dissonanzen im Telephon. Angenommen also es hätte ein Blinder wirklich gelernt einige Buchstaben nach den Dissonanzen zu unterscheiden, so ist zu befürchten, daß er dieselben vielleicht schon nach kurzer Zeit nicht mehr erkennt; der Blinde müßte also immer wieder umlernen. Es scheint mir daher auf diesem Wege ein dauernder Erfolg überhaupt ausgeschlossen; dem Optophon dürfte in dieser Form keine Zukunft beschieden sein.

Da die Übertragung der Buchstaben durch das Gehör vom physiologischen Standpunkte aus bedenklich erscheint, haben M. Finzenhagen und ich (494) den Weg eingeschlagen, dem Blinden die Druckschrift durch das Gefühl zum Bewußtsein zu bringen. Die ersten Arbeiten meines Mitarbeiters Finzenhagen fallen schon in das Jahr 1913, während ich erst später mich an der Lösung des Problems beteiligt habe.

Der Grundgedanke, auf dem die Blindenlesemaschine von Finzenhagen und Ries beruht, ist der, daß die Buchstaben in Bildpunkte zerlegt, die Bildpunkte mittels Selenzellen in Stromstöße umgesetzt und dadurch Tast- oder Reizvorrichtungen betätigt werden, die durch entsprechende Reizungen der Finger dem Blinden die Buchstaben zum Bewußtsein bringen; der Blinde hat das Gefühl, als gleite ihm die Druckschrift in Form einer großen, erhabenen Punktschrift unter den Fingern hindurch.

Die Lösung dieses Problems wäre aber unmöglich gewesen, wenn es nicht gelungen wäre, ein ganz neues und einfaches, wunderbares Relais zu erfinden, das nicht bloß auf die schwachen Effekte ausreichend anspricht, sondern uns auch unabhängig macht von den schädlichen Eigenschaften des Selens, von der Trägheit und Inkonstanz. Dieses Relais, das nur auf die Unterschiede von Hell und Dunkel reagiert, habe ich Differentialrelais (S. 226) genannt.

Die Blindenlesemaschine besteht aus drei Hauptteilen, der optischen und Selenzellenanordnung, dem Lesetisch und der elektrischen Apparatur. Durch ein Linsensystem wird von einem ganz schmalen Streifen der Lesefläche ein vergrößertes Bild entworfen und auf ein System von 8 nebeneinander liegenden Selenzellen projiziert. Solange der Lichtstreifen die weiße Papierfläche trifft, ist das Selenzellensystem beleuchtet; geht aber ein Buchstabe durch den Lichtstreifen, so wird das Zellensystem durch die Schattenbilder der Buchstabenpunkte verdunkelt. Wir denken uns jede Druckzeile durch parallele Linien in 8 Teile zerlegt, wie es in Fig. 228 bei dem Wort „Truppe“ durchgeführt ist. Der Buchstabe T des Wortes Truppe zerfällt demnach in 6, u in 4, p in 6 verschieden liegende Teile. Die von den einzelnen Bildpunkten des Wortes Truppe entworfenen Schattenbilder verteilen sich in der aus Fig. 229—231 ersichtlichen Weise über das Selenzellensystem. Der Buchstabe T wirkt zuerst nur auf die Zelle 1, dann gleichzeitig auf die Zellen 1 bis 6 (Fig. 229), schließlich wieder nur auf 1. Der Buchstabe u beschattet nur die Zellen 3 bis 6 (Fig. 230), während das p die Zellen 3 bis 8 (Fig. 231) beeinflußt. Die Beschattung der

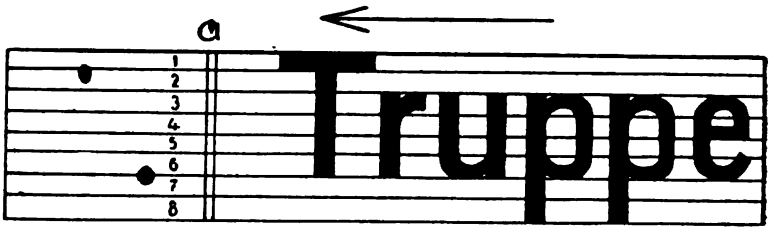


Fig. 228.

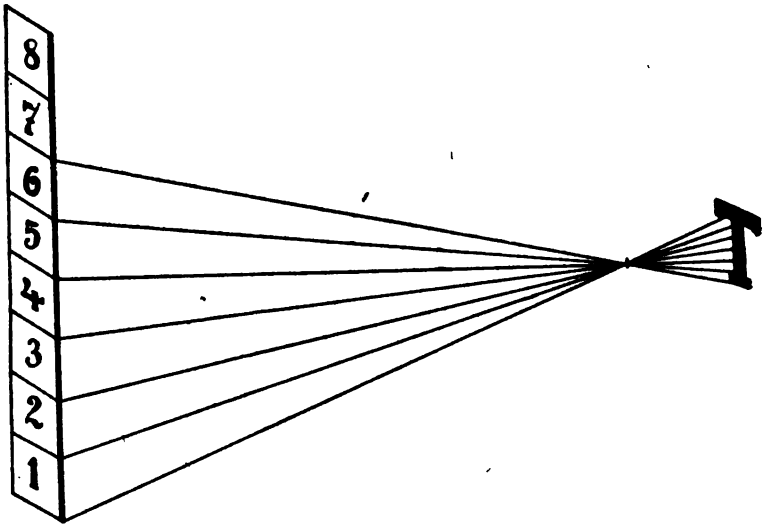


Fig. 229.

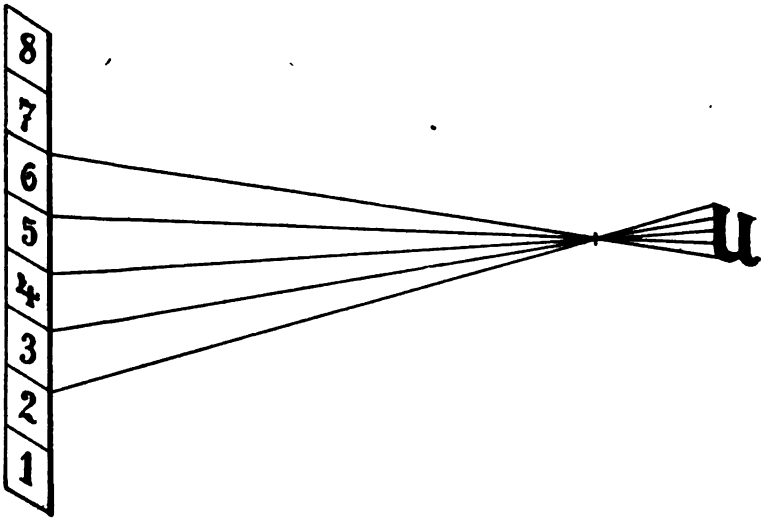


Fig 230.

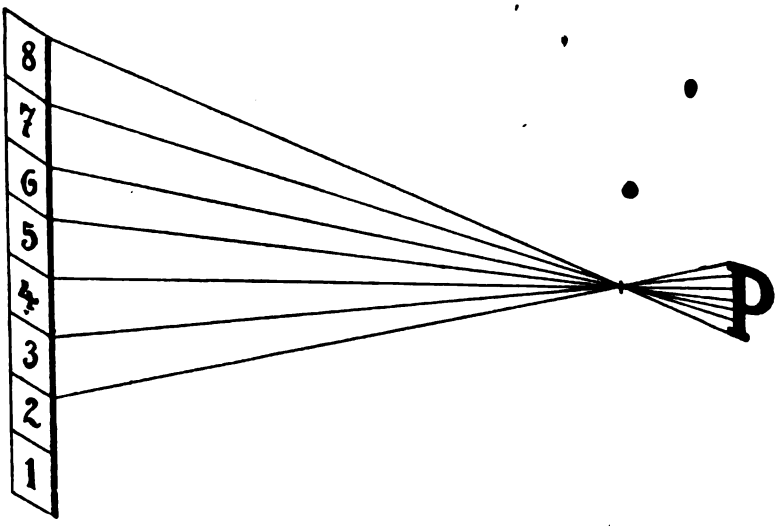


Fig. 231.

Zellen erfolgt in demjenigen Augenblick, in dem die Bildpunkte über eine ganz bestimmte Stelle z. B. über den dünnen Streifen a in Fig. 228 gehen.

In Fig. 232 ist die optische Einrichtung und Selenzellenanordnung dargestellt. Wir müssen uns das Wort „Truppe“

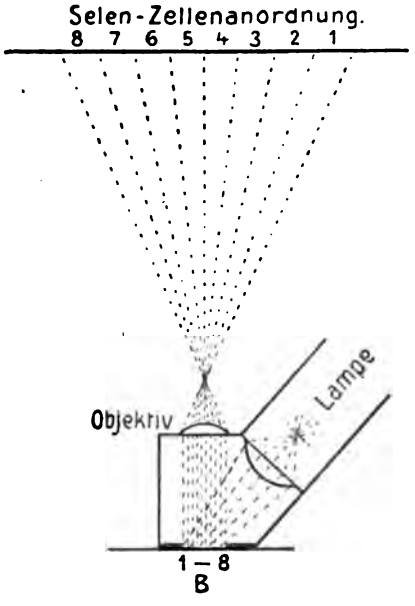


Fig. 232.

senkrecht zur Bildfläche von unten nach oben so durchgezogen denken, daß die 8 Zeilen des Schriftbildes „Truppe“ bei B mit den Zeilen 1—8 sich decken.

Man hat nun dafür zu sorgen, daß die durch die Schattenbilder in den Zellen hervorgerufenen Stromschwankungen zur Betätigung geeigneter Apparate ausgenützt werden. Ist jede Selenzelle mit einer Tastvorrichtung verbunden, die beim Erscheinen eines Schattenbildes durch den entstehenden Stromstoß gehoben werden kann, so könnten die Buchstaben durch die sich hebenden Tasten oder Stifte in Form einer erhabenen Punktschrift für den Sehenden sichtbar, für den Blinden fühlbar gemacht werden.

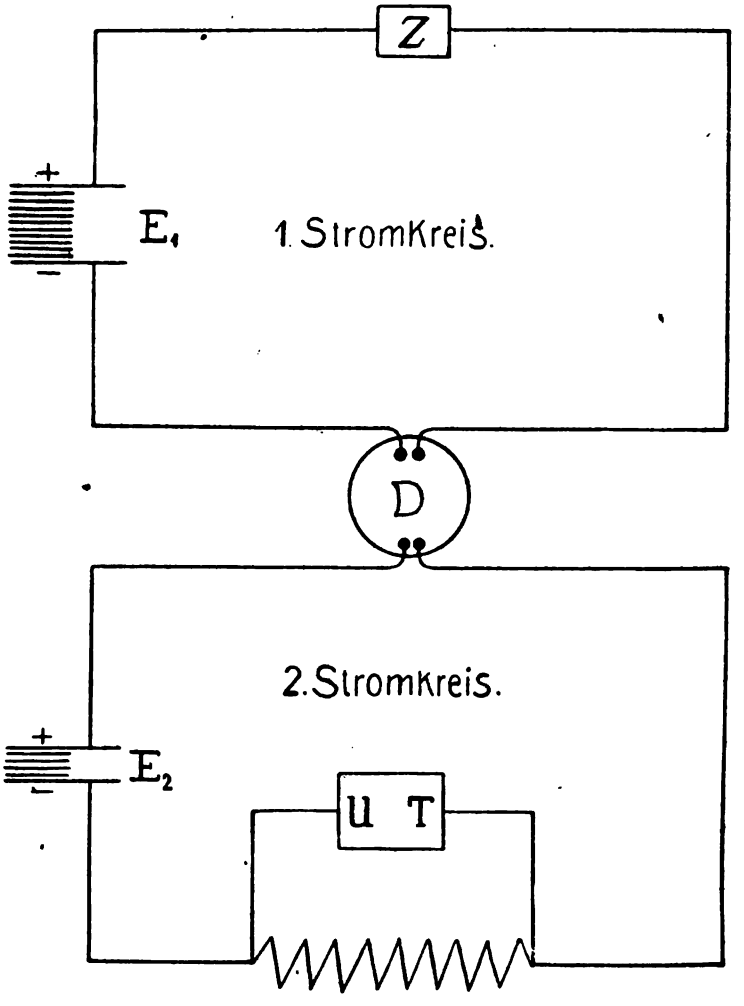


Fig. 233.

Die Schaltung einer einzelnen Selenzelle ist aus Fig. 233 ersichtlich. Es existieren 2 Stromkreise. Der erste Stromkreis ist gebildet aus der Stromquelle E_1, der Selenzelle *Z* und dem Differentialrelais D; der zweite besteht aus der Kontaktvorrichtung des Differentialrelais D, der Stromquelle E_2 und der zum Reizen der Finger nötigen Reiz- oder Tastvorrichtung T. Bei Belichtung der Selenzelle *Z* ist der 2. Stromkreis unterbrochen; wird aber die Zelle durch das Schattenbild eines Bildpunktes verdunkelt, so wird der 2. Stromkreis für die Dauer der Verdunkelung geschlossen und die Vorrichtung T betätigt.

Die Gesamtschaltung ist in Fig. 234 dargestellt, wo *Z* die Selenzellen, D die Differentialrelais, T die Reizvorrichtungen bedeuten. Infolge des hohen Selenwiderstandes und des ganz geringen Stromverbrauches kann man die 8 Selenzellen an eine einzige Stromquelle E_1 in Parallelschaltung anlegen. In der gleichen Weise sind die Tastvorrichtungen an die Stromquelle E_2 angeschlossen. Es sind gleich viele Selenzellen, Differentialrelais und Tastvorrichtungen angebracht und zwar in unserem Falle je acht. Tritt z. B. der Buchstabe p in das Bildfeld ein, so werden gleichzeitig die Selenzellen 3—8 und die zugehörigen Differentialrelais D_3 bis D_8 beeinflußt; letztere aber betätigen wieder die Tastvorrichtungen T_3 bis T_8.

Damit die Buchstabenbilder der Reihe nach auf das Selenzellensystem geworfen werden, muß man entweder die mit dem Zellensystem festverbundene optische Anordnung längs der Zelle von links nach rechts verschieben oder den Lesestoff von rechts nach links. Hierauf ist eine zur Zeilenrichtung senkrechte kleine Bewegung nötig, um die Buchstaben der nächsten Zeile projizieren zu können. Die Lesevorrichtung muß demnach aus 2 verschiebbaren Einrichtungen bestehen. Bei dem in Fig. 235 abgebildeten Lesetisch ist der Lesestoff verschiebbar. Grundplatte I, welche die Verschiebung von Zeile zu Zeile ermöglicht, wird durch einen leichten Druck der in der Tastvorrichtung liegenden Fingerspitzen nach vorn verschoben. Eine mit der Grundplatte fest verbundene Schienenvorrichtung II, die den Lesestoff trägt, ermöglicht die Bewegung längs der Zeile. Vorn am Lesetisch sehen wir mehrere Vertiefungen, in denen die Tastvorrichtungen sich befinden. Die 4 Finger der linken Hand liegen in den links angebrachten Näpfen, die 4 Finger der rechten Hand in den rechts vorgesehenen; dagegen greifen die in der Mitte befindlichen Daumen in je eine Hebelvorrichtung SS bezw. JJ ein. Während die 8 Finger in den Näpfen ruhig liegen bleiben, haben die beiden Daumen von Zeit zu Zeit ihre Hebelvorrichtungen zu betätigen. Die Einrichtung ist so getroffen, daß bei der ruckweise erfolgenden Vorwärtsbewegung der Grundplatte, wie sie zum Zwecke der Verschiebung von Zeile zu Zeile nötig ist,

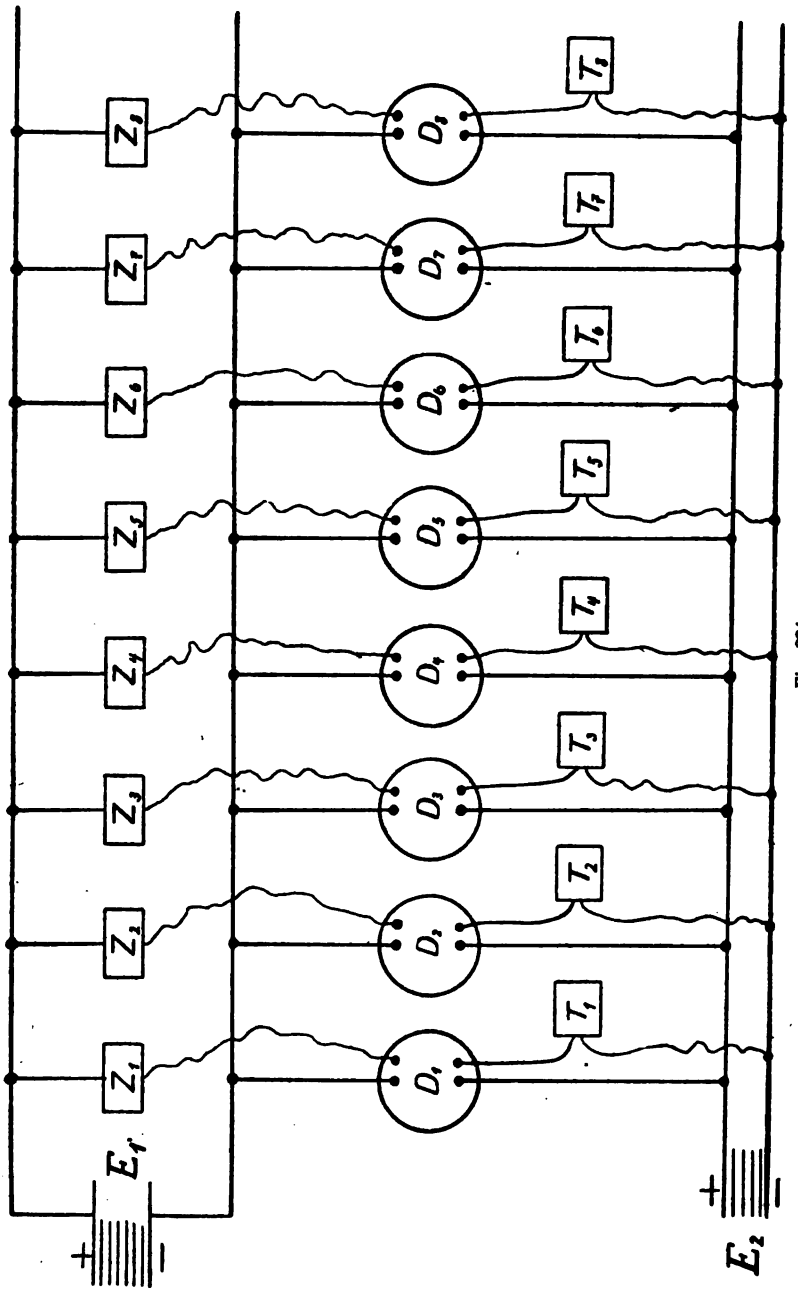

Z_1
Z_2
Z_3
Z_4
Z_5
Z_6
Z_7
Z_8
D_1
D_2
D_3
D_4
D_5
D_6
D_7
D_8
T_1
T_2
T_3
T_4
T_5
T_6
T_7
T_8
E_1
E_2

Fig. 234.

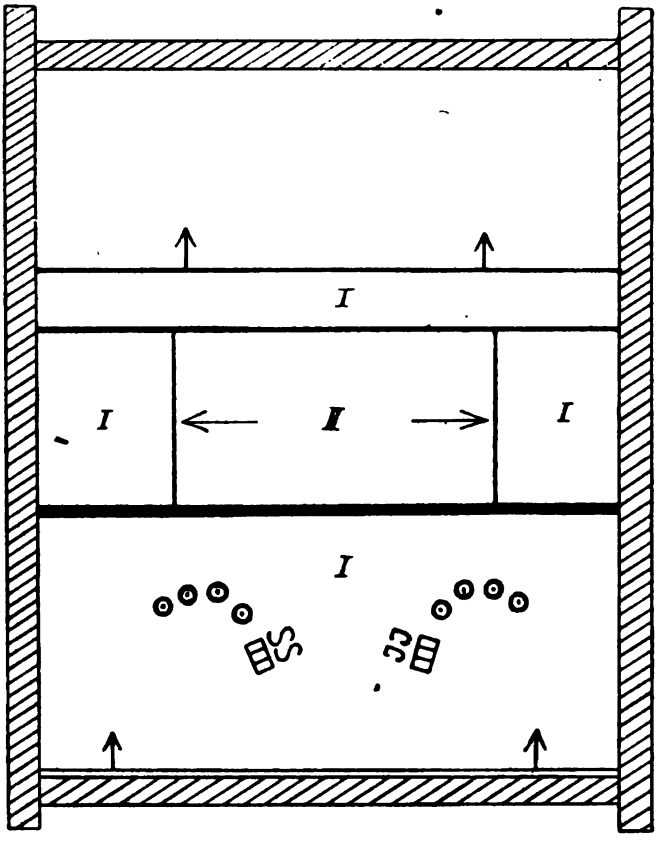


Fig. 235.

eine Vorrichtung ausgelöst wird, die automatisch die Hin- und Herbewegung der Platte II veranlaßt. Es fällt nun dem Daumen der linken Hand die Aufgabe zu, die Geschwindigkeit der Bewegung zu regeln. Besonders der Anfänger wird es nötig haben, die Verschiebung des Lesestoffes längs der Zeile mittels eben dieser Vorrichtung SS zu verlangsamen. Während sich der Lesestoff von links nach rechts bewegt, wird die Stromquelle E_2 zur Vermeidung von Störungen automatisch ausgeschaltet. Noch sei erwähnt, daß durch eine besondere Vorrichtung der Abstand von Lesefläche und Objektiv der optischen Einrichtung stets gleich bleibt und daß, sobald durch Abtasten die Entfernung zweier Zeilen gefunden ist, die Vorwärtsbewegung der Grundplatte I von Zeile zu Zeile ruckweise immer in gleicher Größe ausgeführt werden kann. Die entsprechende Einstellung übernimmt der Daumen bei JJ. Zu beachten ist ferner, daß nicht alle Schriften gleich groß

sind, weshalb noch eine scherenartige Vorrichtung angebracht ist, durch die das Selenzellensystem in die entsprechende Lage gebracht werden kann.

Die Reizung der Finger läßt sich auf verschiedene Weise erreichen. Man kann in jedem der 3 Näpfe eine Tastvorrichtung anbringen, die den Finger nicht berührt, solange die zugehörige Selenzelle beleuchtet ist. Fallen aber auf einzelne Zellen Schattenbilder, so werden die entsprechenden Tasten auf elektromagnetischem Wege gehoben und die Finger berührt. Da nun die bloße Berührung besonders bei schnellerem Lesen kein sicheres Empfinden hervorruft, berührt die Taste, solange das Schattenbild auf die zugehörige Selenzelle wirkt, den Finger nicht dauernd, sondern mit raschen Unterbrechungen; dies kann durch Verbindung eines selbsttätigen Unterbrechers U mit der Tastvorrichtung T (Fig. 233) erreicht werden. Außer der Anwendung der Vibration kann die Reizung der Finger durch verschieden starke Erwärmung der Tasten oder durch geeignete Elektrisierung der Finger erfolgen. In letzterem Falle besteht die Reizvorrichtung aus einem gespaltenen Napf; dieser ist mit den Polen einer entsprechenden Induktionsvorrichtung verbunden, deren primäre Rolle im 2. Stromkreis liegt.

Nach mehrfachen Änderungen (495, 510) erhielt die Einrichtung der elektrischen Reizung die aus Fig. 236 ersichtliche Form. D ist ein Differentialrelais, $R_1 R_2$ die aus einem gespaltenen Napf bestehende Reizvorrichtung, I ein Induktor mit Dauerbetrieb, der 8 einzelne Sekundärwickelungen für die 8 Reizvorrichtungen trägt.

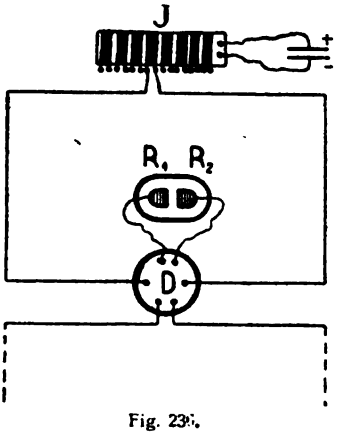


Fig. 236.

Wenn nun die Schattenbilder der Buchstaben über das Zellensystem hinweggleiten, so beeinflussen die Bildpunkte die zugehörigen Selenzellen und Relais und diese wieder die

entsprechenden Reizvorrichtungen. Die Wirkung ist also die gleiche, als wenn dem Blinden die Buchstaben in Form einer großen erhabenen Punktschrift unter den in einer geraden Linie gedachten Fingerspitzen (Fig. 237) hindurchgleiten.

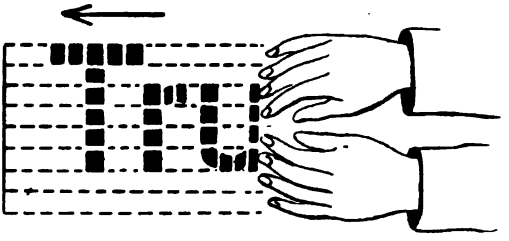


Fig 237.

Bei der Blindenlesemaschine von Finzenhagen und Ries wird demnach ein Buchstabe in mehrere Bildpunkte zerlegt, von denen jeder auf eine bestimmte Selenzeile wirkt; die dadurch hervorgerufenen Stromstöße betätigen Tastvorrichtungen mit verschiedenartigen Reizen und teilen den Fingern des Blinden die Bildpunkte genau in der dem Buchstaben eigenen Reihenfolge mit, so daß der Blinde die Vorstellung bekommt, als gleite ihm eine große erhabene Punktschrift unter den Fingern durch. Wenn nun auch bei dieser Art der Übertragung der Blinde mehr Einzelheiten von einem Buchstaben erhält als bei der jetzigen Blindenschrift, so wird er trotzdem keine Last beim Lesen empfinden, wie es z. B. bei der früheren Reliefschrift der Fall war, da er die Schrift nicht aufzusuchen und abzutasten hat, sondern sie ohne Bewegung der Fingerspitzen mitgeteilt erhält. Zur Zeit werden Versuche unternommen, jede Druckzeile in nur fünf Teile zu zerlegen und die Zahl der Tasten auf fünf herabzusetzen. Je weniger Einzelheiten von einem Buchstaben der Blinde zur Erfassung der Schrift nötig hat, desto einfacher und billiger wird die Maschine. Die Blindenlesemaschine ist nicht an das Vorhandensein einer elektrischen Leitung gebunden; sie ist vielmehr in jedem einfachen Hause betriebsfähig. Denn die elektrische Beleuchtung kann durch Azetylenlicht ersetzt werden, die Tastvorrichtung erfordert nur 1—2 Elemente, während für den Betrieb der Hauptleitung eine größere Trockenbatterie oder geeignete Taschenlampenbatterie genügt, da bei dem hohen Widerstande des Selens der Stromverbrauch außerordentlich klein ist. Einen fertigen Apparat dieser Art gibt es zur Zeit noch nicht.

Zum Schlusse sei noch auf die Broschüre von Chr. Ries „Blindenlesemaschine", Verlag Huber, Diessen vor München, 1916 mit 43 Abbildungen hingewiesen.

Obwohl mir die Übertragung der Buchstaben durch das Gehör, wie schon betont, vom physiologischen Standpunkte aus bedenklich erscheint, will ich doch einen von mir gemachten (494, 496) Vorschlag zum Bau eines Lichthörers, der auf dem eben angegebenen Prinzip beruht, nicht unerwähnt lassen.

Es ist, wie wir gesehen haben, jeder Zeit möglich, Buchstaben in Bildpunkte aufzulösen und diese mittels Selenzellen in Stromstöße umzusetzen. Diese Ströme kann man dazu benützen, genau bestimmte T ö n e zu erregen. Verwendet man die bekannte, in Fig. 233 abgebildete Schaltung und ersetzt die Reizvorrichtung T durch einen tönenden Körper, der bei Beeinflussung der zugehörigen Selenzelle etwa auf elektromagnetischem Wege erregt wird, so kann man die Bildpunkte in genau bestimmte Töne umwandeln. Da diese nie alle gleichzeitig erklingen, sondern nur einzeln oder in ganz gewissen Gruppen, so kann man bei geeigneter Auswahl der Töne aus deren Reihenfolge und Zusammenstellung leicht auf die Form des Buchstabens schließen. Während es bei dem oben beschriebenen Optophon eine ungeheure Zahl von Tonverbindungen und Tonvariationen gibt — abgesehen von den anderen großen Schwierigkeiten —, liegen hier die Verhältnisse sehr einfach. Mein Optophon, das die Bildpunkte der Buchstaben in 8 bestimmte, unveränderliche Töne umsetzt, gleicht einem Gesang, der von einem Notenblatt gesungen wird. Wie sich ein Musikkundiger nach dem Liede die Notenschrift genau vorstellen kann, so erkennt auch der Blinde nach einiger Übung aus den Tönen meines Optophons die Anordnung der Buchstabenpunkte und somit die Buchstaben selbst.

Die zarten Töne der 8 Tonerreger (Lautgeber) werden in einem Hörrohr verdichtet, das man über das Ohr stecken kann, so daß der Blinde die beiden Hände zur Bedienung der Lesevorrichtung freibekommt.

Hufschmidt (502) hat kürzlich ein Verfahren angegeben, bei dem der Gesichtssinn ebenfalls durch den Tastsinn ersetzt werden soll. Hufschmidt benützt eine aus sehr vielen kleinen Selenzellen bestehende Selenplatte *Z* (Fig. 238), die auf der Stirne zu tragen ist. Die Selenplatte ist direkt in den sekundären Stromkreis eines Induktionsapparates eingeschaltet, so daß der Induktionsstrom durch die einzelnen Selenzellen auf Metallstifte, welche die Stirnhaut berühren, übergehen kann. Während im Dunkeln der Strom nicht fühlbar ist, sollen bei Belichtung einzelner Selenzellen durch die zugehörigen Metallstifte an den betreffenden Hautstellen gelinde Reize hervorgebracht werden, aus deren Stärke und Anordnung der Blinde ein Bild von den Vorgängen bekommen soll.

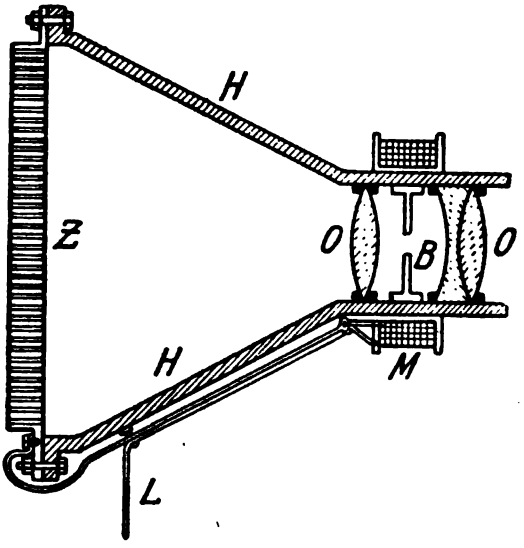


Fig. 238.

Dieser Vorschlag von Hufschmidt zeichnet sich durch größte Einfachheit aus, leider aber ist es mir bei derartigen Anordnungen niemals gelungen, irgend welche für die Gefühlsnerven merkliche Schwankungen des Induktionsstroms bei so geringen Lichtintensitäten festzustellen. Dazu kommen dann noch die Nachteile der winzigen Selenpräparate. Eben wegen des vollständig unbefriedigenden Ausfalles jener Versuche mußten wir uns bei dem Baue unserer Blindenlesemaschine dazu entschließen, die nötigen Unterschiede in der Stärke der Induktionsströme durch Vermittlung von Relais zu erzeugen.

Einen interessanten Vorschlag zur Umsetzung der Druckschrift in Sprachlaute bringt L. Machts (489, 490). In Fig. 239 stellen die im linken Teil eingezeichneten kleinen Quadrate die Anordnung von sehr kleinen Selenpräparaten dar. Die Selenzellen 1'—7' bilden ein o, kommt noch 8' und 9' dazu, so entsteht ein a; fügt man aber 8' und 10' hinzu, so erhält man ein v, während 11' und 12' mit 1'—7' ein b bilden. Fällt nun das Schattenbild des Buchstabens o auf die Zellenreihe 1'—7', so wird durch die zugehörigen Elektromagnete 1 —7 ein zweiter Stromkreis eingeschaltet, der von der Batterie A ausgeht. Sobald nun weißes Papier der Selenzelle 1' gegenübersteht, wird der zugehörige Magnet 1 erregt, wobei er eine kleine Feder 38 anzieht und den Kontakt zwischen 37 und 39 aufhebt. Wenn aber die Selenzelle 1' verdunkelt wird, wird die Feder vom Magnet losgelassen und der Kon-

takt 37—39 geschlossen. Werden alle Selenzellen 1'—7' verdunkelt, so kann der von A kommende Strom alle Kontakte 36—44 durchlaufen und in eine Leitung o gelangen. Werden die Selenzellen 1'—7' sowie 8' und 9' verdunkelt, was durch den Buchstaben a geschieht, so geht der Strom nach Betätigung der Magnete 8^x und 9^x mittels der Kontake 44—46 in eine Leitung a. Die Leitung o, die ebenfalls vom Strom durchflossen wird, da o in a enthalten ist, wird dann mit Hilfe des Elektromagneten x, der den Kontakt 54—56 unter-

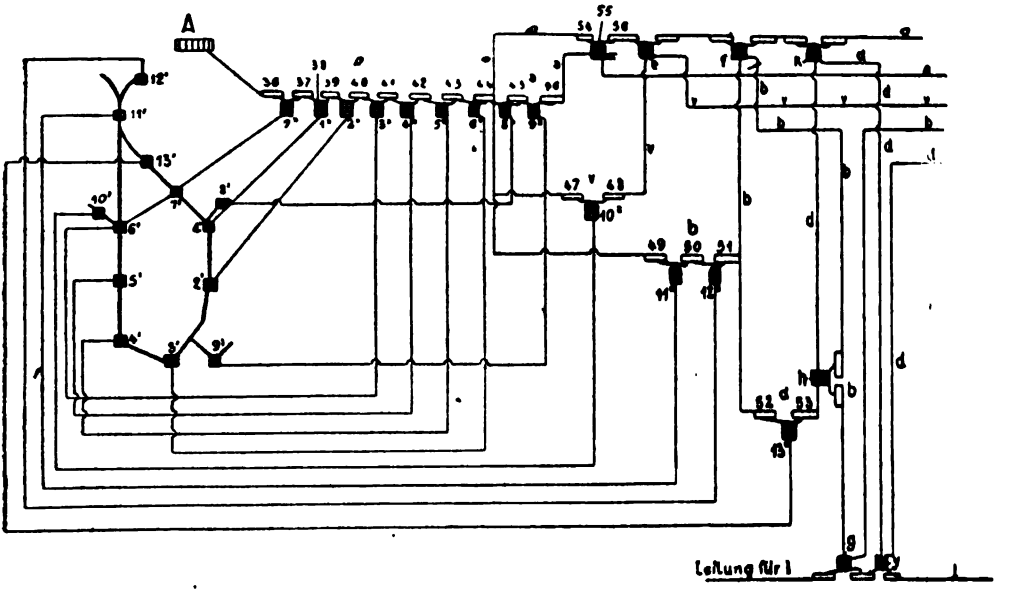


Fig. 239.

bricht, vollständig ausgeschaltet. In ähnlicher Weise ist die Schaltung für die übrigen Buchstaben. Die Leitungen o, a. etc. sind je (Fig. 240) mit einem Magneten o', a' etc. verbunden. Sobald der Magnet o' erregt wird, schließt er mittels der Feder 82 den Kontakt 80—81, so daß nunmehr die Induktionsströme, die in dem Sprechmagneten 58 entstehen, vor dem eine Stahlwalze rotiert, im Telephon t als Laute wiedergegeben werden. Jeder Buchstabe besitzt einen eigenen Sprechmagneten, vor dem auf der Walze die entsprechenden Schwingungen des Lautes aufgezeichnet sind. Die gleichlautenden, in der Schrift verschiedenen, großen und kleinen Buchstaben besitzen zwar verschiedene Stromschlußvorrichtungen, betätigen aber denselben Sprechmagneten.

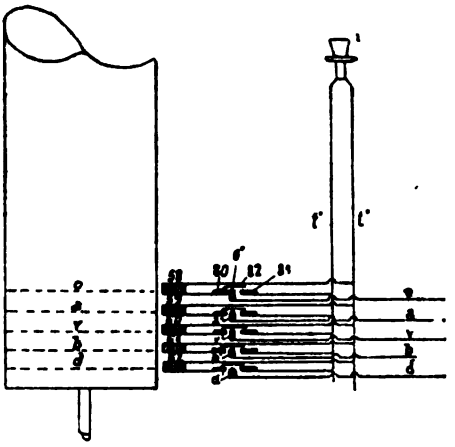


Fig. 240.

Diese Idee von Machts ist in mehreren Einzelheiten recht interessant, läßt sich aber mit den angegebenen Hilfsmitteln nicht in die Praxis umsetzen. Denn jedes Selenpräparat besteht lediglich aus einem Stückchen Selen, das die abgeplatteten Enden zweier Drähte verbindet. Ein derartiges Präparat hat natürlich einen so mächtigen Widerstand, daß an eine Betätigung der Apparate bei einer Helligkeitsänderung gar nicht zu denken ist. Außerdem ist auch die Inkonstanz dieser Selenpräparate in keiner Weise berücksichtigt. Dagegen läßt sich die Idee vielleicht verwirklichen bei Verwendung von Selenzellen normaler Größe unter Einschaltung meines Differentialrelais.

XIV. Die elektrische Übertragung von Bildern und Zeichnungen.

Eine sehr interessante Anwendung hat die Selenzelle zur elektrischen Übertragung von Bildern gefunden. Seit dem Jahre 1877 hat eine ganze Reihe von Forschern Konstruktionen von Apparaten zur Übertragung von Fernbildern insbesondere mittels der Selenzelle angegeben und ausgeführt. Die verschiedenen Methoden stimmen im allgemeinen darin überein, daß auf der Empfangsstation das zu übertragende Bild in lauter Bildpunkte von verschiedener Helligkeit zerlegt wird, welche eine Zelle beeinflussen und Stromschwankungen verursachen. Auf der Empfangsstation handelt es sich darum, die Stromundulationen wieder in Bildpunkte um-

zusetzen. Letzteres sucht man auf verschiedenem Wege zu erreichen, z. B. durch elektrochemische Zersetzung, durch Benutzung der elektromagnetischen Drehung der Polarisationsebene eines Lichtstrahles, durch Verwendung der Drehungen einer Galvanometernadel, der Schwingungen eines Saitengalvanometers, der Schwingungen einer Telephonmembran, der magnetischen Ablenkung der Kathodenstrahlen, der Lichtempfindlichkeit des Selens. In einigen Fällen wurde auf der Gebestation statt einer einzelnen Zelle ein ganzes Netz von lauter kleinen Zellen und eine große Anzahl von Leitungsdrähten verwendet. Es kann hier auf die Konstruktionen der einzelnen Forscher nicht eingegangen werden. Der vollkommendste von all diesen Apparaten ist zweifellos der Kornsche Fernphotograph (1902), mit dem bereits ausgezeichnete Resultate erzielt wurden. Es soll daher dieser im folgenden ausführlicher beschrieben werden.

Eine fernphotographische Anlage von A. Korn (378) besteht wie eine telephonische aus Gebe- und Empfangsstation. Auf der Gebestation wird die zu übertragende Photographie in der Form eines transparenten Films auf einen Glaszylinder aufgewickelt und das Licht einer konstanten Lichtquelle (Nernstlampe) mit Hilfe einer Linse auf ein kleines Element der Photographie konzentriert. Das Licht durchdringt die Photographie und den Glaszylinder und wird durch ein im Innern des Zylinders befindliches total reflektierendes Prisma auf eine Selenzelle reflektiert; letztere ist durch eine Leitung mit der Empfangsstation verbunden. Die Selenzelle wird je nach der Tönung der Photographie an der betreffenden Stelle um so mehr oder weniger belichtet. Wenn das Licht über ein helleres Element hinweggeht, fließt infolge der Leitfähigkeitsvergrößerung der Selenzelle ein stärkerer Strom zum Empfangsort, ein schwächerer dagegen, wenn das Licht über Stellen mit dunklerer Tönung hinweggeht. Die Ströme werden also in ihrer Stärke fortlaufend den Tönungen der Photographie an den vom Licht durchsetzten Elementen entsprechen.

An der Empfangsstation handelt es sich darum, aus den aufeinander folgenden, vom Geber kommenden Strömen das Bild wieder zusammenzusetzen und es wird daher hier eine einigermaßen analoge Einrichtung erforderlich sein. Man konzentriert wieder das Licht einer Nernstlampe auf einen Punkt des Empfangsfilms und trägt Sorge, daß die Intensität des auf den Film fallenden Lichtes mit Hilfe der vom Geber ankommenden Ströme in jedem Moment so geregelt wird, daß der photographische Eindruck auf dem Film der Stärke des gerade ankommenden Stromes, also der Tönung des entsprechenden Elementes der Originalphotographie entspricht Es wird dies dadurch erreicht, daß man die ankommenden

Ströme dazu benutzt, mit Hilfe einer beweglichen Blende das auffallende Licht mehr oder minder abzublenden. Wenn diese Blende entsprechend den ankommenden Strömen mehr oder weniger Licht fortnimmt und wenn beide Zylinder, im Geber und Empfänger, in genau derselben Weise (synchron) rotieren, muß offenbar die Photographie auf dem Empfangsfilm reproduziert werden.

Die Regulierung der Lichtintensität mittels der beweglichen Blende geschieht durch das Lichtrelais (S. 236). Die vom Geber ankommenden Ströme passieren im Empfänger ein Saitengalvanometer, d. h. zwei zwischen den Polen eines Elektromagneten gespannte Metallbändchen, auf welche ein kleines Aluminiumplättchen geklebt ist. Durch diese Metallfäden werden die vom Geber kommenden Ströme geleitet; je nach der Stärke dieser Ströme erhalten die Metallfäden und somit das Aluminiumplättchen eine mehr oder minder große Ablenkung. Das Licht einer Nernstlampe wird auf dieses Plättchen konzentriert und mit Hilfe einer kleinen Linse ein Bild des Aluminiumplättchens auf eine Öffnung in dem Empfangskasten geworfen, in dem der Empfangsfilm rotiert. Je nach der Ablenkung bedeckt der Schatten des Plättchens mehr oder weniger die in den Empfangskasten führende Öffnung. Der Film erhält also mehr oder weniger Licht je nach der Stärke der Ablenkung des Plättchens bezw. der Stärke der ankommenden Ströme entsprechend den Tönungen der korrespondierenden Elemente der Originalphotographie im Geber.

Um einen vollständigen Gleichlauf (Synchronismus) zwischen den Zylindern im Geber und Empfänger zu erhalten, werden beide Zylinder durch gleichartige Elektromotoren getrieben, die auf dieselbe Umdrehungszahl eingestellt werden können; außerdem können durch eine besondere Vorrichtung nach jeder Umdrehung irgendwelche auftretende Fehler korrigiert werden. Jeder Zylinder verschiebt sich nach einer Umdrehung ein klein wenig in der Richtung seiner Achse.

Nun besitzt die Selenzelle eine sehr störende Eigenschaft für die Fernphotographie in der Trägheit. Um eine Ausgleichung zwischen dem Geber und Empfängerapparat herbeizuführen, hat Korn den Seite 220 beschriebenen Selenkompensator angebracht, indem er eine zweite Selenzelle (Kompensationszelle) ähnlichen Belichtungen aussetzt wie die Zelle im Gebezylinder (Fühlerzelle) und beide Zellen so gegeneinander arbeiten läßt, daß sich die Trägheitseffekte aufheben. Fig. 241 enthält das genaue Schema der Schaltung. Se_1 ist die Fühlerzelle im Geber, welche durch die Nernstlampe J_1 beleuchtet wird, und Se_2 die Kompensationszelle, deren Beleuchtung durch die Nernstlampe J_2 unter Zwischenschaltung des Lichtrelais NS erfolgt. Die beiden Zellen sind gegenein-

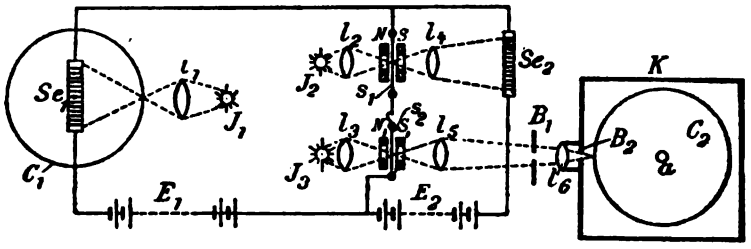


Fig. 241.

ander geschaltet. Das Lichtrelais NS liegt in der Brücke und ist mit dem Lichtrelais N_1S_1 der Empfangsstation hintereinander geschaltet. Im Dunkeln sei die Brücke stromlos; besitzen aber die beiden Zellen verschiedene Lichtempfindlichkeit, so ändern sie bei Belichtung ihre Widerstände nicht im Verhältnis der Dunkelwiderstände, so daß durch die Brücke ein Strom fließt, der gleich der Differenz der in den Zweigen Se_1 und Se_2 fließenden Ströme ist. Die Fühlerzellen von Korn haben im allgemeinen Widerstände von 200 000 bis 500 000 Ohm im Dunkeln, müssen möglichst empfindlich sein und wenig Trägheit besitzen. Die Kompensationszellen haben 50 000 bis 150 000 Ohm und müssen verhältnismäßig träger und weniger empfindlich sein. Wird nun die Fühlerzelle Se_1 belichtet, so wird das Brückengleichgewicht gestört und ein entsprechender Strom fließt durch die Brücke, wodurch eine Beeinflussung des Relais NS und eine entsprechende Belichtung von Se_2 bewirkt wird. Auf diese Weise wird der Widerstand von Se_2 verringert, so daß gleichzeitig auch ein dem früheren entgegengesetzter Strom in die Brücke gesandt wird. Es ist nun die Aufgabe des Apparates, die in der Brücke entstehenden Ströme den augenblicklichen Belichtungen der Fühlerzelle Se_1 proportional zu machen unter Hinweghebung der Trägheitsfehler der Selenzellen. Wenn nun aber der Brückenstrom den Belichtungen der Fühlerzelle proportional ist, so gilt dies auch von den Ablenkungen des photographierenden Saitengalvanometers N_1S_1 der Empfangsstation und somit auch von den Eindrücken, welche die Elemente des Aufnahmefilms erhalten.

Während nun früher die Kompensationszelle im Empfänger lag, ist bei der neueren Anordnung die Selenkompensation im Geber angebracht. Die einfache Fig. 242 zeigt die Schaltung des kompensierenden Galvanometers g und des empfangenden G. Durch diese Anordnung wurden wesentliche Vorteile erzielt; insbesondere reicht nun ein einziges Galvanometer für jede Station aus, da man jedes Instrument sowohl als Empfangs- wie als Kompensationsgalvanometer verwenden kann.

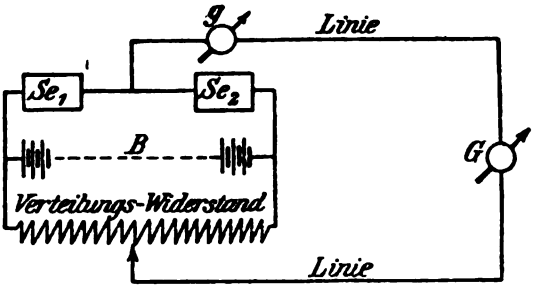


Fig. 242.

Die ersten zufriedenstellenden Ergebnisse wurden im Jahre 1904 erreicht, indem Photographien auf einer vierfach hintereinander geschlossenen Telephonleitung von ca. 800 km von München nach Nürnberg übertragen wurden. Heute hindert keine Entfernung mehr die Erzielung einer guten Fernphotographie; aber es muß auf gute Isolation der Leitungen sehr geachtet werden, so daß für die Fernphotographien nur die Telephonleitungen und gut isolierten Kabel in Betracht kommen. Von besonderer Bedeutung aber ist es für die praktische Verwertung der Fernphotographie, daß man auf derselben

Fig. 243.

Telephonleitung gleichzeitig sprechen und telephotographieren kann, ohne daß beides sich auch nur im geringsten stört, indem die Schwingungszahl der Photographieströme außerordentlich niedrig ist gegen die der Sprechströme.

Fig. 244.

Je näher die Linien auf dem Bilde aneinander gezogen werden, um so mehr Details wird man von der Photographie geben können. Fig. 243 enthält ein Fernbild, bei dem die Linien ziemlich weit von einander abstehen; die Übertragungszeit betrug 6 Minuten. Dagegen sind im Fernbild 244 die Linien einander sehr nahe gerückt, weshalb auch die Übertragung 12 Minuten dauerte. Im übrigen wird die Übertragungszeit um so kürzer sein, je schneller der Lichtstrahl über das Papier gleitet. Korn hat bereits im Jahre 1907 Bilder — im Geber 13×24 cm, im Empfänger 6,5×12 cm — in 6 bis 12 Minuten übertragen und es ist sehr wahrscheinlich, daß man die Übertragungszeit noch weiter verkürzen kann.

Infolge der geringen Intensität der Linienströme machte sich bei vielen Übertragungen die Störung durch Nebenleitung geltend, so daß auf viel beanspruchten Leitungen nur in den Nachtstunden gearbeitet werden konnte. Fig. 245 zeigt uns ein Fernbild mit Linien, die schwingungsartig bald

Fig. 245.

helle, bald dunkle Punkte enthalten. Durch Anrufe in Nebenlinien traten Induktionswirkungen auf, die Schwingungen des Lichtrelais und damit Schwärzungsunterschiede auf dem Empfangsfilm zur Folge hatten. In Abb. 246 ist ein durch Störungen unbrauchbar gemachtes Bild, das zwischen Paris und London übertragen wurde, wiedergegeben.

Um den praktischen Wert der Selenmethode für die Bildtelegraphie zu heben, mußte ein Mittel zur Verstärkung der Linienströme gefunden werden. Die Einführung des Zwischenklisches (S. 233) und die Erfindung des Stufenrelais (S. 234) durch Korn, (442, 485, 487) brachten den gewünschten Erfolg. Die schwachen Selenströme lassen sich durch das Stufenrelais derartig verstärken, daß Lochstreifen hergestellt werden können, die das zu übertragende Bild darstellen. Jede Lochkombination des fünfzeiligen Lochstreifens entspricht einem Bildelemente. Die Lochstreifen werden mit Hilfe eines Empfangsapparates des Schnelltelegraphen von Siemens und Halske hergestellt und zwar in einer Helligkeitsskala von 1 bis 14, so daß z. B. die Lochkombination $2+4+5$ (je ein Loch in der zweiten, vierten und fünften Zeile) der Helligkeitsmaßzahl 11 entspricht. Für ein Porträt genügt ein Streifen mit etwa 25 000 Lochkombinationen, den man in einer Stunde anfertigen kann. Von diesen Lochstreifen läßt sich mit Hilfe von Kontaktstiften, die je nach der Lage der unter den Stiften hindurchgleitenden Löcher mehr oder weniger

elektromotorische Kräfte an die Linie anlegen, das Bild mit der Transmissionsgeschwindigkeit senden, welche die Linie überhaupt zuläßt. Zur automatischen Wiederherstellung des Bildes auf der Empfangsstation läßt man den erhaltenen Lochstreifen durch den Geber eines Schnelltelegraphen von Siemens und Halske laufen und sorgt durch die Kontakte des Apparates dafür, daß das als Empfänger dienende Saitengalvanometer größere und kleinere Ausschläge, entsprechend den Lochkombinationen des Lochstreifens, ausführt. Das Bild wird also in der Empfangsstation wieder mit Hilfe des Saitengalvanometers, wie es früher bei der direkten Methode der Bildübertragung (S. 327) beschrieben wurde, rekonstruiert.

Ein anderer Weg zur Wiederherstellung des Bildes an der Empfangsstation besteht darin, daß man das Bild mittels einer Schreibmaschine zusammensetzt; diese muß an Stelle

Fig 246.

der Buchstaben kleine Kreise von solchen Abmessungen tragen, daß ihre Flächen den Helligkeitsmaßzahlen der Bildelemente proportional sind.

Die Weitergabe des Bildes durch die Fernleitung kann auch in der Weise geschehen, daß man in der Sendestation den Lochstreifen in ein Buchstabentelegramm umsetzt, indem man ihn durch den Schnelltelegraphen von Siemens u. Halske laufen läßt. Dieses Buchstabentelegramm sendet man durch die Fernleitung nach der Empfangsstation, wo es mit Hilfe des Schnelltelegraphen wieder in einen Lochstreifen umgesetzt werden kann.

Natürlich ist die direkte Methode der Bildtelegraphie ohne Anwendung von Zwischenklisches in allen Fällen vorzuziehen, in denen sehr gut isolierte Leitungen ohne hohe Kapazität z. B. gute Fernsprechleitungen zur Verfügung stehen. Dagegen wird man bei telegraphischen Leitungen hoher Kapazität z. B. bei langen Kabeln die Methode des Zwischenklisches benützen.

Fig. 247.

Fig. 248.

Die ersten fernphotographischen Stationen nach dem Kornschen System wurden in München und Berlin errichtet; an sie schlossen sich Paris, London, Kopenhagen, Stockholm, Newyork an. Schon der heutige Stand der Kornschen Fernphotographie eröffnet dem Weltverkehr, der Justiz und Presse große Aussichten. Wenn es erst noch gelingt, die Übertragungszeit herabzusetzen und die Erfindung allgemein in die Praxis einzuführen, dann wird die Kornsche Fernphotographie im Dienste der Menschheit die Würdigung finden, die ihr gebührt.

Die Abbildungen 247 und 248 enthalten noch einige Fernbilder, von denen das erstere mit einem gewöhnlichen Demonstrationsapparat von Max Kohl erhalten wurde.

Von den zahlreichen übrigen Konstruktionen zur Übertragung von Fernbildern soll hier nur der Bildtelegraph von Tschörner noch eingehender behandelt werden. Wer sich für die Geschichte der Fernphotographie im einzelnen interessiert, dem kann das Werk „Korn und Glatzel, Handbuch der Photographie und Telautographie" besonders empfohlen werden.

Tschörner (409) hat einen Apparat konstruiert, der die Vorteile der Kopiertelegraphen mit denen der Phototelegraphen verbindet. Die Apparate zur Übertragung von Bildern zerfallen bekanntlich in zwei Gruppen, in die Kopier- und Phototelegraphen. Während mittels der ersteren nur Schwarz- und Weißbilder übertragen werden können, gestatten letztere die Übertragung eines Bildes mit allen seinen Tönungen.

Die Kopiertelegraphen arbeiten mit einzelnen Stromstößen wie der Telegraph, die Phototelegraphen dagegen mit kontinuierlichem Strom wechselnder Intensität wie beim Telephon. Die Arbeitsweise der beiden Gruppen von Apparaten bedingt es auch, daß Phototelegraphen ausschließlich auf Telephonleitungen angewiesen sind, während die Kopiertelegraphen jede Telegraphenleitung benützen können. Die Übertragung eines Bildes mit dem Kopiertelegraphen hat den großen Nachteil, daß das Originalbild erst in leitende und nichtleitende Bildelemente umgewandelt werden muß, während man bei dem Phototelegraphen direkt das Originalnegativ verwenden kann. Tschörner hat bei seinem Apparat die Vorteile beider Systeme zu vereinigen gesucht. Die Tönungen des zu übertragenden Bildes werden durch eine rotierende Kontaktvorrichtung automatisch in Punkte und Striche umgewandelt, so daß nur Stromstöße verschiedener Dauer in die Leitung gesandt werden und jede Telegraphenleitung zur Verwendung kommen kann.

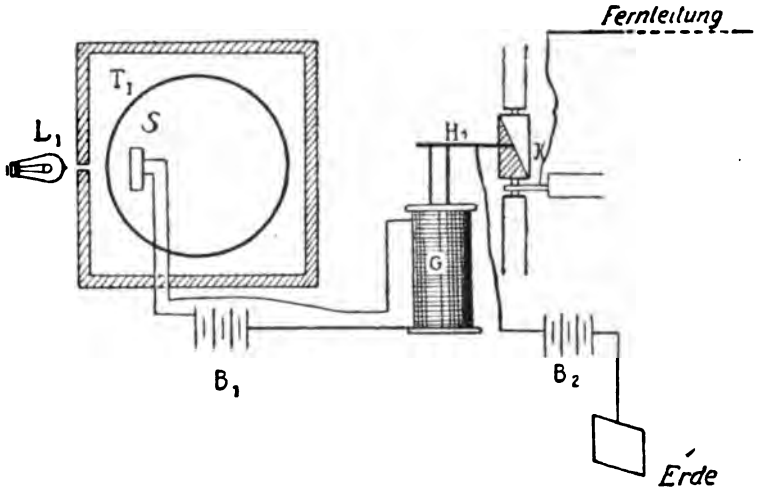


Fig. 249.

Fig. 249 gibt uns Aufschluß über die Anordnung der Apparate in der Sendestation. In dem Kasten befindet sich ein rotierender Glaszylinder T_1, auf dem das Negativ des Bildes aufgespannt ist. Das Licht der Lampe L_1 fällt durch die Öffnung im Kasten und durch das Negativ auf die Selenzelle S, welche mit der Stromquelle B_1 und dem Galvanometer oder Selenoid G verbunden ist. Die Selenzelle wird den Tönungen des Bildes entsprechend beeinflußt und es entstehen Stromschwankungen und Veränderungen der Zeiger-

stellung des Galvanometers, so daß die mit der Stromquelle B_2 verbundene Bürste höher und niedriger auf dem Kontaktgeber K schleift. Der Kontaktgeber rotiert mit entsprechender Geschwindigkeit und besitzt eine oder mehrere leitende Belegungen in Form von Dreiecken. Schleift die Bürste an der Spitze des Dreiecks, so wird nur ein kurzer Stromstoß in die Leitung gesandt. Je nach Stellung der Bürste dauert der Stromstoß länger oder kürzer, so daß das Bild auf diese Weise den Tonwerten entsprechend in lauter verschieden große Stromstöße zerlegt wird.

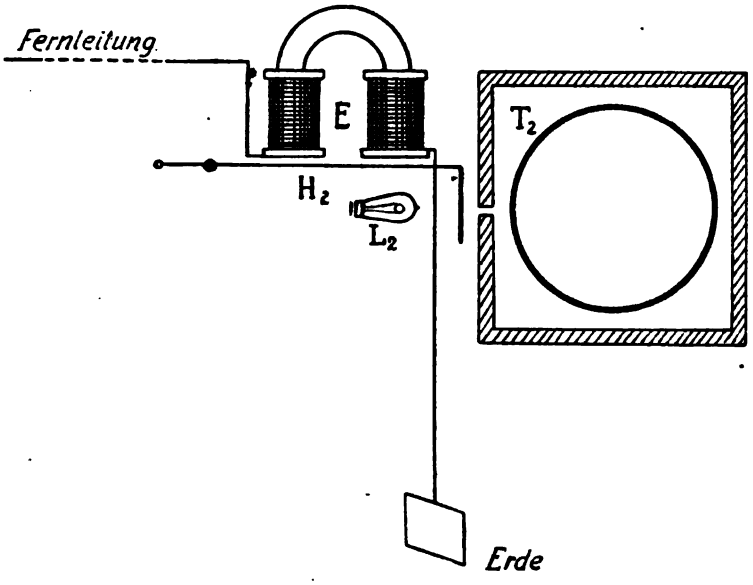


Fig. 250.

In der Empfangsstation (Fig. 250) wird durch die ankommenden Stromstöße mittels des Hebels H_2 ein Lichtschieber betätigt, der das Licht der Lampe L_2 beliebig abschließen kann. Wird der Lichtschieber geöffnet, so fällt das Licht durch eine Öffnung im Kasten auf eine lichtempfindliche Schicht, die auf dem Zylinder T_2 aufgespannt ist. Wird der Schieber nur kurze Zeit geöffnet, so entsteht nur ein kleiner Punkt auf der lichtempfindlichen Schicht, bei längerem Offenstehen des Schiebers aber erhält man einen großen Punkt. Die Einrichtung ist derartig getroffen, daß der Zylinder bei jeder Belichtung stillsteht und nachher durch einen Elekromagnet um einen Betrag, der einem Bildpunkt entspricht, weitergedreht wird. Auf diesem Wege wird das

in der Sendestation aufgegebene Bild hier in der Empfangsstation wieder durch Bildpunkte zusammengesetzt.

Einfacher als die Bildübertragung ist die telegraphische Übermittlung von Handschriften und Zeichnungen, von Wetterkarten u. a. Hier verwendet man indes gewöhnlich die sogenannte telautographische Methode, bei der kein Selen zur Verwendung kommt. Die zu übertragende Handschrift oder Zeichnung wird in einer nichtleitenden Materie auf eine Metallfolie aufgetragen und diese Metallfolie um den Gebezylinder gewickelt. Während sich der Zylinder dreht, schleift eine Metallspitze auf der Folie und tastet diese in einer engen Schraubenlinie ab. Die Einrichtung ist nun so getroffen, daß der nach der Empfangsstation führende Strom immer dann unterbrochen wird, wenn die Metallspitze über einen nichtleitenden Teil der Folie, also über die Handschrift bezw. Zeichnung, schleift. In der Empfangsstation wird auf einem photographischen Film, der mittels eines Zylinders die gleichen Rotationen wie die Metallfolie in der Gebestation ausführt, durch eine entsprechende optische Anordnung ein Lichtpunkt erzeugt, der spiralenförmig den Film durchläuft. Da der Lichtpunkt ein Lichtrelais d. h. die Öffnung des Aluminiumplättchens (S. 236) zu passieren hat, so wird er immer dann abgeblendet, wenn kein Strom durch die Fernleitung und das Galvanometer geht. Auf diese Weise werden die nichtleitenden Stellen im Geber auf dem Film des Empfänger sichtbar.

Von besonderer Wichtigkeit wäre die drahtlose Fernphotographie, vor allem die Übertragung von Bildern und Zeichnungen von Luftschiffen und Flugzeugen aus zur Erde. Im Prinzip stehen der Verwirklichung drahtloser Bildübertragung keine unüberwindlichen Hindernisse im Weg. Es wäre nur eine Vergrößerung der elektrischen Energie nötig, da die für die gewöhnliche drahtlose Telegraphie ausreichende Energie für die Bildübertragung nicht genügt. Bei der Übertragung hat man dafür zu sorgen, daß in der Sendestation den Tönungen der Bildpunkte immer bestimmte Schwingungsdauern der Wellen entsprechen. In der Empfangsstation kann man dann die Zeichen, den verschiedenen Schwingungsdauern entsprechend, auf einem Zwischenklische registrieren und mit dessen Hilfe das Bild rekonstruieren. —

XV. Fernsehen.

Die Bildtelegraphie ermöglicht es, das Bild eines Gegenstandes auf weite Strecken in zirka 6 Minuten zu übertragen. Wenn es gelingt, das Gleiche in einem Bruchteil einer Sekunde zu vollbringen, ist das Problem eines elektrischen Fernsehers gelöst. Da die Geschwindigkeit der Übertragung mehr als tausendmal größer werden müßte, lassen sich die Bildtelegraphen in ihrer jetzigen Form nicht dazu verwenden, in der Ferne sich abspielende Vorgänge gleichzeitig an einem beliebigen Orte auf einem Schirm sichtbar zu machen. Denn es ist schon nicht denkbar, daß mechanische Anordnungen wie Galvanometerspiegel, elektromagnetische Hebel etc., die bei dem jetzigen Betrieb in der Sekunde etwa 4—5 Schwingungen vollführen, zirka 10 000 Schwingungen in der Sekunde ausführen sollen; die Trägheit von körperlichen Massen ist das wesentliche Hindernis für eine so rasche Übertragung von Bildern.

Die allgemeinen Prinzipien eines elektrischen Fernsehers sind folgende: Ein in die Ferne zu übertragendes Bild wird mittels einer photographischen Kammer auf eine Selenzelle projiziert; das entstehende verkleinerte Bild wird aber nicht als Ganzes auf die Zelle geworfen, sondern in lauter Bildpunkte in rascher Folge zerlegt. Dies kann dadurch geschehen, daß sich vor der lichtelektrischen Zelle ein Schirm mit einer entsprechenden Anordnung von Öffnungen bewegt. Nehmen wir an, Fig. 251 sei das verkleinerte Bild auf der Mattscheibe der photographischen Kammer, an Stelle der Mattscheibe aber befinde sich ein undurchsichtiges Band ohne Ende, das in schräger Richtung gelocht ist (Fig. 252). Das Band, das gleiche Breite mit dem Bild hat, läuft mit konstanter Geschwindigkeit vor der Zelle vorbei. Sollen, wie in Fig. 251 angedeutet, 100 Bildpunkte übertragen werden, so gleitet zuerst Öffnung I des Bandes über die Bildpunkte 1 bis 10 hinweg. Ist der senkrechte Abstand der Öffnungen I und II auf dem Band gleich der Länge des Bildes, so nähert sich die Öffnung II dem Bildpunkte 11, sobald Öffnung I den Bildpunkt 10 verläßt. Hat also die Öffnung I den ersten Bildstreifen eben passiert, so beginnt das Loch II den zweiten Streifen abzutasten u. s. f. Das ganze Bild ist also in 100 Bildpunkte zerlegt, sobald das Band von A_1 zu B_1 fortgeschritten ist. Dieses Spiel muß sich in der Sekunde mehrere Male wiederholen. Die aufeinander folgenden Lichtimpulse der Bildpunkte werden mittels einer Linse auf die Selenzelle konzentriert, so daß in dem zugehörigen Stromkreis entsprechende Stromschwankungen entstehen. Der Stromkreis

1	11	21	31	41	51	61	71	81	91
2	12	22	32	42	52	62	72	82	92
3	13	23	33	43	53	63	73	83	93
4	14	24	34	44	54	64	74	84	94
5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
6	16	26	36	46	56	66	76	86	96
7	17	27	37	47	57	67	77	87	97
8	18	28	38	48	58	68	78	88	98
9	19	29	39	49	59	69	79	89	99
10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Fig. 251.

ist gebildet aus einer Stromquelle, der Selenzelle in der Sendestation und einem entsprechenden Apparat in der Empfangsstation. Dieser Empfänger hat die Aufgabe, die ankommenden Stromschwankungen wieder in entsprechende Bildpunkte umzusetzen. Die Empfangsstation wird in mancher Beziehung mit der Sendestation Ähnlichkeit aufweisen. Man kann wieder ein durchlochtes Band anwenden, das jenem der Sendestation in Form und Bewegung genau entspricht. Sorgt man dafür, daß durch jede Öffnung genau so viel Licht fällt, als durch die entsprechende Öffnung in der Sendestation geht, so muß die Vereinigung der einzelnen Lichtpunkte das Bild richtig wiedergeben.

Die Regulierung der Lichtstärke muß natürlich mit Hilfe der Stromschwankungen in der Fernleitung erfolgen. Man stellt dem durchlochten Band eine konstante Lichtquelle gegenüber und schaltet zwischen beide ein Lichtfilter ein, das durch die Ströme der Fernleitung reguliert wird. Um das Bild bequem betrachten zu können, bringt man dem Band gegenüber einen Schirm an, auf dem die aus den Öffnungen kommenden Lichtstrahlen durch ihre Helligkeitsunterschiede das Bild hervorrufen. Ist die Folge der Bildpunkte eine sehr rasche, so vermag unser Auge die einzelnen Lichteindrücke nicht mehr von einander zu trennen und es entsteht in uns die Vorstellung eines einheitlichen Bildes.

Will man ein gutes Bild erhalten, so muß man das verkleinerte Bild der photographischen Kammer nicht in 100,

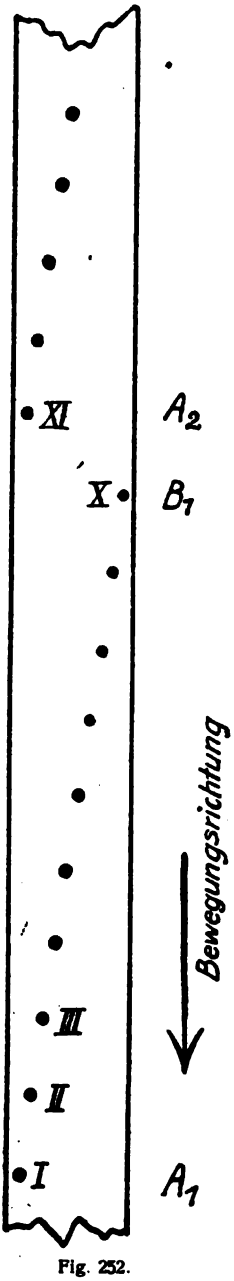


Fig. 252.

sondern in einige Tausend Bildpunkte zerlegen, und dieses Spiel muß sich in jeder Sekunde zirka 10mal wiederholen. Obwohl eine gute Selenzelle zu einer so großen Zahl von Stromschwankungen in der Sekunde noch fähig ist, gibt es zur Zeit noch keinen Fernsehapparat. Bei den bisher vorgeschlagenen Fernsehern handelt es sich wohl um sehr interessante Projekte, die praktische Ausführung derselben stößt aber auf große Schwierigkeiten und zwar hauptsächlich infolge der Trägheit des Selens, indem die Selenzelle den Lichtregulator in der Empfangsstation nicht in entsprechender Weise zu beeinflussen vermag; die Trägheit aber vollständig auszuschalten, dürfte bei der hohen Geschwindigkeit der Übertragung keine kleine Aufgabe sein.

Von anderer Seite (Lux, Dosai, Ruhmer, Nisco u. a.) wurde zur Lösung des Problems der Vorschlag gemacht, eine so große Anzahl von Selenzellen anzuwenden als Bildpunkte zu übertragen sind, also etwa 10 000, so daß eine Zelle immer nur von ein und demselben Bildpunkt beeinflußt wird. In diesem Fall wird also das Bild als Ganzes übertragen.

Es sollen hier nur 3 Vorschläge zur Konstruktion von Fernsehapparaten angegeben werden, obwohl es deren sehr viele gibt. Die folgenden drei Projekte unterscheiden sich wesentlich voneinander sowohl hinsichtlich der Zerlegung des Bildes als hinsichtlich der Wiederumsetzung der Stromschwankungen in Bildpunkte. Der erste Vorschlag stammt von den Gebr. Andersen, der 2. von Lux, der 3. von Dosai.

Der Fernseher von Andersen (346) erregt unser Interesse besonders deswegen, weil er eine Vorrichtung zur Übertragung der Farben enthält. Die Sendestation ist in Fig. 253 abgebildet. G ist das zu übertragende Bild, L_1 die photographische Kammer, B_1 das durchlochte Band, L_2 eine Linse, P ein Prisma, S_1 eine rotierende Schlitzscheibe und Z eine Selenzelle. Die Breite der einzelnen Schlitze der Scheibe (vergl. eigene Figur rechts unten) entspricht der Breite des vom Prisma auf der Scheibe entworfenen Spektrums Sp, ihre Länge der Ausdehnung der einzelnen Farbenbänder. Lochband B_1 und Schlitzscheibe S_1 sind derart gekuppelt, daß während der Wirkung eines einzelnen Bildpunktes ein Schlitz das ganze Spektrum durchläuft. Der von einem Bildpunkt ausgehende Lichtstrahl wird durch das Prisma in seine einfachen Farben zerlegt und die einzelnen Spektralfarben wirken nacheinander auf die Zelle Z.

Fig. 254 veranschaulicht die Empfangsstation. Die vom Projektionsapparat Q K kommenden Lichtstrahlen dringen durch die Öffnungen des durchlochten Bandes B_2 und werden mittels des Objektives O auf den Schirm B projiziert. Auf diesem Wege passieren sie den Lichtvariator V, der aus einer

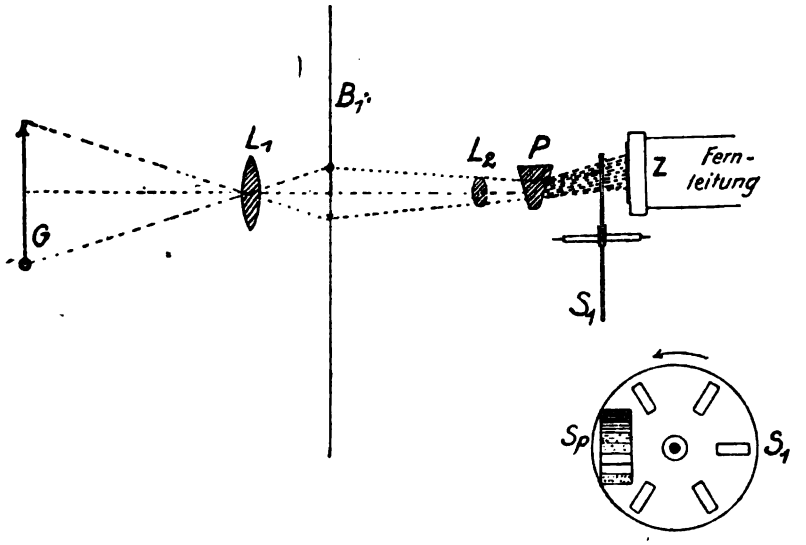


Fig. 253.

Glasscheibe mit stetig zunehmender Lichtdurchlässigkeit von dunkel bis hell besteht und von einem in der Fernleitung liegenden Elektromagnet E gesteuert wird. Vor dem Lichtfilter V ist eine Schlitzscheibe S_2 angebracht, die an ihrem Umfang durchsichtige farbige Glasstreifen in Anordnung des Sonnenspektrums trägt. Diese Scheibe ist mit B_2 so ge-

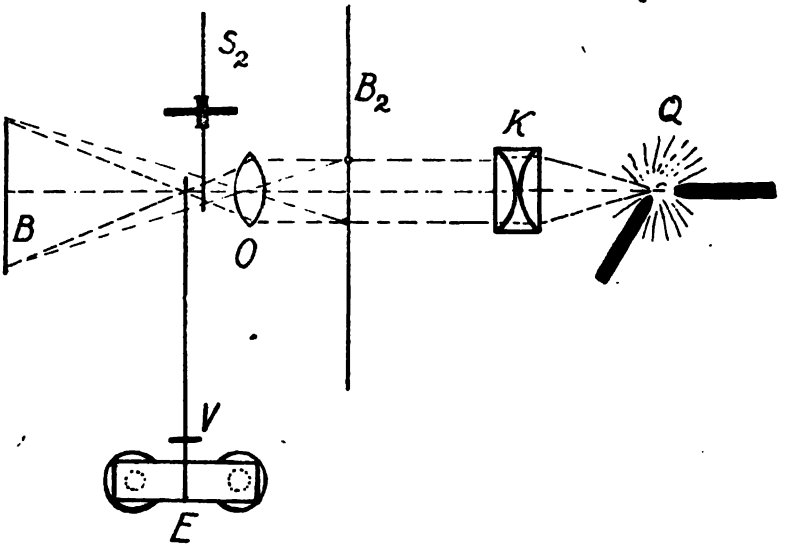


Fig. 254.

kuppelt, daß sie in genau gleicher Weise wie die Schlitzscheibe S_1 der Sendestation rotiert. Da ein durch ein Loch von B_1 fallender farbiger Lichtstrahl die Selenzelle in dem Augenblick trifft, in dem der Schlitz der Scheibe S_1 den gleichfarbigen Teil des Spektrums passiert und sich im gleichen Moment auch im Empfangsapparat der entsprechend gefärbte Glasstreifen im Strahlengang befindet, so wird der betreffende Punkt in der wirklichen Farbe übertragen. Enthält der Bildpunkt mehrere einfache Farben, so werden sie einzeln schnell hintereinander übertragen und mischen sich im Auge des Beobachters wieder zur gleichen Mischfarbe.

Sehr interessant sind die Vorschläge von Lux (249) zur Konstruktion eines Fernsehers. Wir wollen vorerst einzelne Teile der Apparatur uns etwas näher ansehen.

Wie eine Saite zum Mitschwingen und Tönen angeregt wird, wenn in ihrer Nähe ein Ton der gleichen Schwingungsperiode erklingt, so kann man auch eine Metallfeder, die auf eine bestimmte Schwingungszahl abgestuft ist, durch einen geeigneten Wechselstrom oder intermittierenden Gleichstrom zu Schwingungen veranlassen. In Fig. 255 ist die Feder f, die

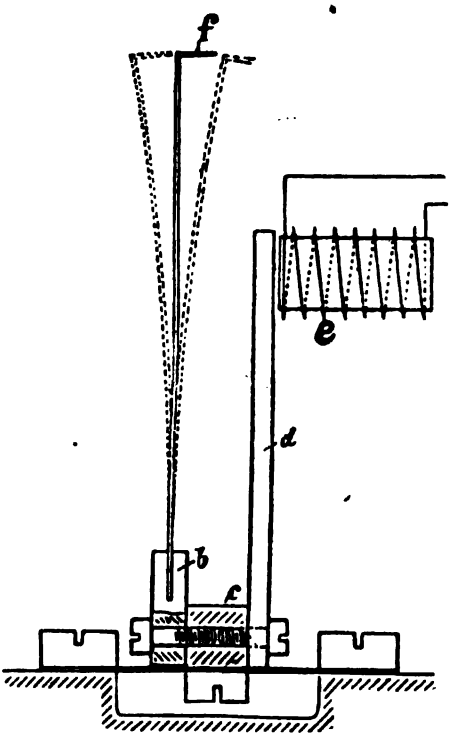


Fig. 255.

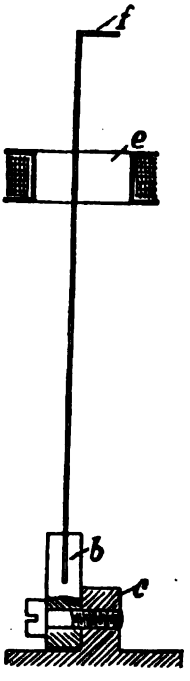


Fig. 256.

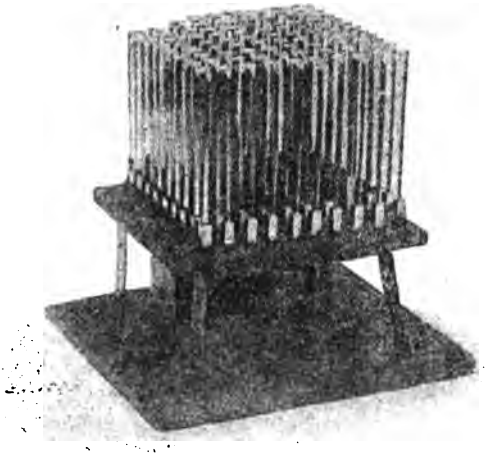


Fig. 257.

oben eine kleine viereckige Platte trägt, auf einen Steg c, der elastisch gelagert ist, aufgesetzt. Auf diesem Steg ist ein Anker d befestigt, der in geringer Entfernung von einem Elektromagneten e steht. Sendet man durch letzteren einen Wechselstrom oder einen Gleichstrom, der in gleichen Zeiträumen unterbrochen wird, so wird der Anker abwechselnd angezogen und wieder losgelassen, also mit der Wechselzahl des Stromes in Bewegung versetzt. Da sich diese Bewegung infolge der elastischen Lagerung auf die Feder f überträgt, gerät diese in Schwingungen, vorausgesetzt daß die Wechselzahl des erregenden Stromes mit der Schwingungszahl der Feder übereinstimmt. Den gleichen Zweck erreicht man mit der in Fig. 256 gezeichneten Anordnung, bei der eine magnetische Feder f etwas außerhalb der magnetischen Mitte einer stromdurchflossenen Spule e angebracht ist. Die Feder gerät in Schwingungen, wenn die Spule von einem Strom durchflossen wird, der die gleiche Schwingungszahl wie die Feder hat.

Anstatt nun nur eine einzige Feder auf dem Stege c zu befestigen, kann man darauf eine ganze Reihe von Federn anbringen, die sämtlich auf verschiedene Schwingungszahlen abgestimmt sind. Läßt man dann durch den Elektromagneten, der vor dem Anker eines solchen Federnkammes angebracht ist, mehrere Ströme von verschiedener Schwingungszahl gehen, so wird der Steg von all diesen Schwingungen erregt, dagegen schwingen immer nur diejenigen Federn mit, deren Schwingungszahlen mit denjenigen der erregenden Ströme übereinstimmen. Ordnet man noch mehrere solche Kämme neben einander an, so erhält man eine Vorrichtung der in Fig. 257 gezeichneten Art. Die Elektromagnete der Federnkämme werden hintereinander oder nebeneinander geschaltet.

Lackiert man die Köpfe der Federn schwarz und den Hintergrund, auf dem die Federn befestigt sind, weiß, so werden diejenigen Stellen, an denen Federn schwingen, weiß erscheinen, da der Hintergrund durch die schnell schwingenden Federn hindurch sichtbar wird. Wenn nun die verschiedenen Elektromagnete von Strömen verschiedener Wechselzahlen durchflossen werden und somit verschiedene Federn schwingen, so entsteht ein weißes Bild auf schwarzem Hintergrund.

Fig. 258 zeigt eine Vorrichtung, die Lux bei Verwendung intermittierender Gleichströme benutzte. Von der Stromquelle s führt der Strom durch die Selenzelle z und den Elektromagnet e nach dem Unterbrecher u und von da zurück nach s. Der Unterbrecher u besteht aus einem mit Isolationsstücken versehenen Zylinder, auf dem eine Kontaktfeder schleift. Rotiert der Zylinder, so entsteht ein intermittierender Gleichstrom.

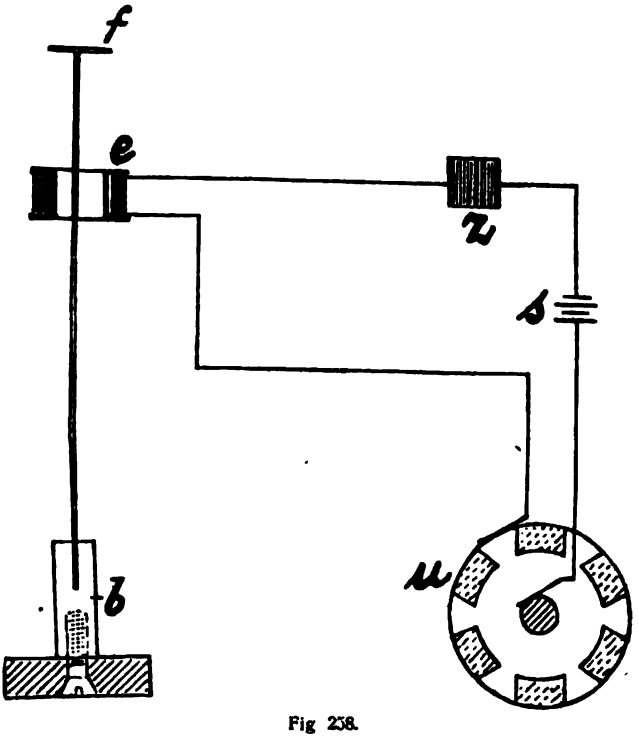


Fig 258.

Die Sendestation enthält eine Selentafel, auf der soviele Selenzellen angebracht sind als Bildpunkte in irgend einem Moment zu übertragen sind; es wird also hier das Bild als Ganzes auf ein Selenzellensystem geworfen. Jede Selenzelle

ist mit einem eigenen Unterbrecher verbunden. Da sämtliche Unterbrecher auf verschiedene Wechselzahlen eingestellt sind, so fließt durch jede Selenzelle ein Strom von anderer Wechselzahl. Die Gesamtschaltung ist aus Fig. 259 ersichtlich; sämtliche Selenzellen z_1, z_2, z_3 sind mit je einem Stromunterbrecher u_1, u_2, u_3 etc. parallel geschaltet, während die Spulen e, die sich in der Empfangsstation befinden und die Federn f zum Schwingen anregen, hintereinander geschaltet sind.

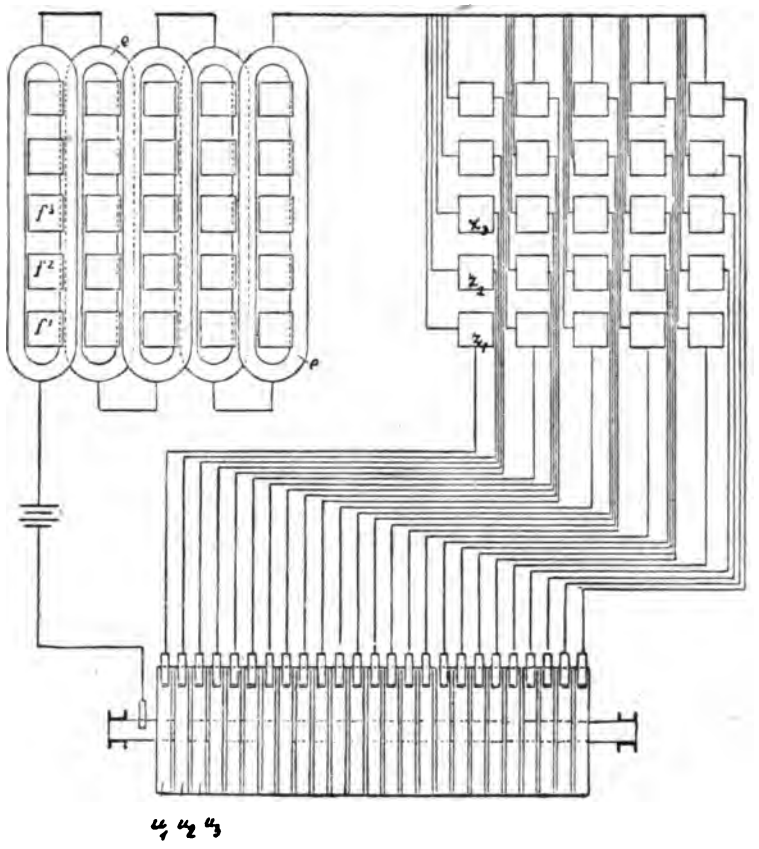


Fig. 259.

Der Vorgang bei Übertragung eines Bildes ist nun folgender. Die hellen Stellen des durch eine optische Vorrichtung auf das Selenzellensystem geworfenen Bildes belichten die entsprechenden Selenzellen, wodurch die zugehörigen Ströme von bestimmter Wechselzahl verstärkt werden. Diese Ströme bringen die den jeweiligen Zellen entsprechenden

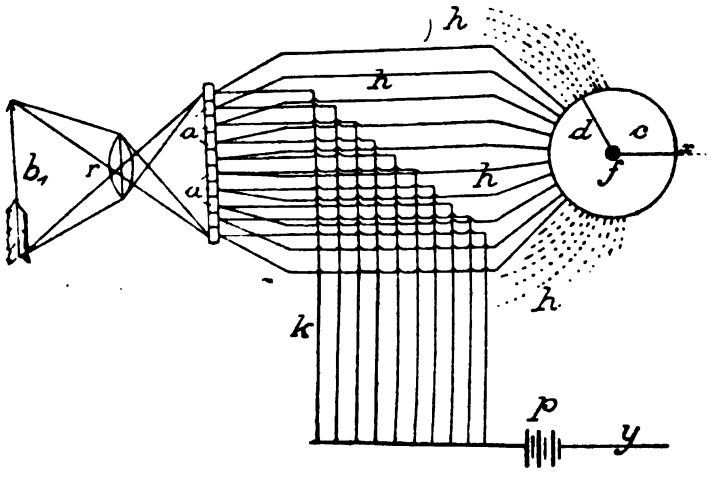


Fig. 260.

Federn zum Schwingen und erzeugen auf dem Empfängerfeld helle Flecken. Je nach der Anzahl belichteter Zellen entsteht eine entsprechende Zahl heller Flecken, aus denen sich das Bild zusammensetzt.

Die Dosaische Anordnung (374) ist in Fig. 260 und 261 dargestellt. Die Sendestation veranschaulicht Fig. 260, die Empfangsstation Fig. 261. Das Bild des Gegenstandes b_1 wird auf eine aus vielen Selenzellen bestehende Tafel a geworfen. Jede Zelle ist einerseits durch den Draht h mit einem Kontaktstück an der Peripherie des Verteilers c, anderer-

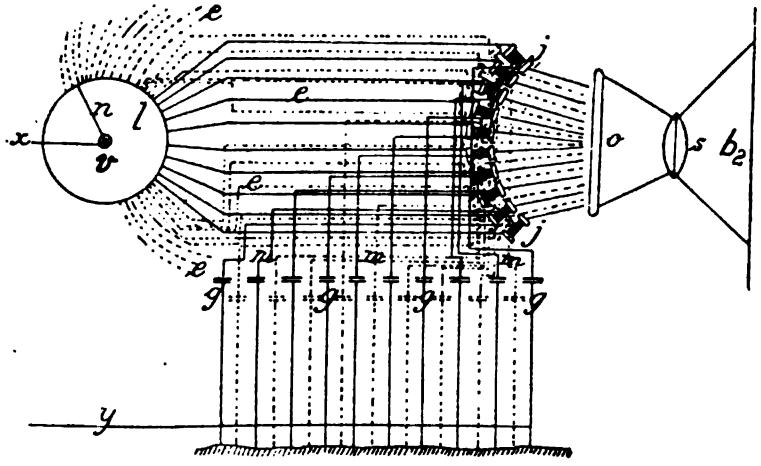


Fig. 261.

seits durch einen Draht k mit dem einen Pol der Batterie p verbunden. Durch einen um die Achse f rotierenden Arm d werden bei jeder Umdrehung sämtliche Selenzellen nach einander mit der Fernleitung x in Verbindung gebracht. Die Empfangsstation enthält so viele Elektromagnete, als die Sendestation Selenzellen. Von jedem Elektromagnet führt eine Leitung zu einem Kontaktstück des Verteilers 1, die zweite über einen Kondensator g zu dem anderen Pol der Batterie p. Bei synchroner Rotation der beiden Verteilungsarme d und n werden stets entsprechende Selenzellen und Elektromagnete verbunden. Die Pole der Elektromagnete bilden eine Fläche, vor der eine flache, viereckige Quecksilberdampflampe O angeordnet ist. Wird nun das Bild des Gegenstandes b_1 mittels der Linse r auf die Selentafel a geworfen, so werden die Zellen bezw. Elektromagnete je nach der Helligkeit der zugehörigen Bildpunkte beeinflußt. Da die Lampe dort, wo die Elektromagnete stärker erregt werden, mehr Licht ausstrahlt als an Stellen schwächerer Erregung, ergibt sich eine Lichtverteilung der leuchtenden Dampffläche, die dem Bilde des Gegenstandes b_1 entspricht. Mittels der Linse s läßt sich das Bild auf den Schirm b_2 projizieren. Während die Selenzellen gleichzeitig beeinflußt werden, erfolgt die Erregung der Elektromagnete nacheinander in rascher Folge und zwar mindestens 10 mal in der Sekunde.

Die Anwendung einer so großen Zahl von Selenzellen, wie sie die zuletzt genannten Konstruktionen aufweisen, empfiehlt sich natürlich nicht für die Praxis. Abgesehen davon, daß die Herstellung eines solchen Apparates sehr kompliziert und mit beträchtlichen Kosten verbunden wäre, käme als Haupterfordernis dazu, daß alle Zellen unter sich vollständig gleich sein müßten. Es handelt sich also hier doch wohl nur um einen allerdings ganz interessanten Vorschlag, in der Praxis aber wird man mit einer oder wenigen Selenzellen auskommen müssen. Wenn wir ernstlich die Frage erwägen, ob mit den augenblicklich zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln der Wissenschaft und Technik der Bau eines Fernsehapparates zu verwirklichen ist, so werden wir zu dem Schlusse kommen, daß eine vollkommene Lösung des Problems in einer praktisch ausführbaren Form noch nicht möglich ist.

C.

Literaturübersicht.

1818.

1. Berzelius (Neues Journal für Chemie und Physik [Schweiger] 23, 309 und 430, 1818 und Annalen der Physik und Chemie 7, 242, 1826) Ueber die Schwefelsalze.

1839.

2. Knox (Transactions of the Royal Irish Academy 19, 149, 1843) Versuche mit amorphem Selen.

1845.

3. Rieß (Annalen der Physik und Chemie 64, 50, 1845) Ueber das elektrische Leitvermögen einiger Stoffe.

1848.

4. F. v. Schaffgotsch (Journal für praktische Chemie 43, 308, 1848) Ueber das spezifische Gewicht des Selens.

1851.

5. Hittorf (Annalen der Physik und Chemie 84, 214, 1851) Ueber die Allotropie des Selens.

1853.

6. F. v. Schaffgotsch (Annalen der Physik und Chemie 90, 66, 1853) Ueber das spezifische Gewicht des Selens.

1855.

7. Mitscherlich (Berichte der Berliner Akademie der Wissenschaften 132 und 409, 1855 und Journal für praktische Chemie 66, 257, 1855) Ueber die Kristallformen und die isomeren Zustände des Selens.

1856.

8. Regnault (Annales de chimie et de physique 46, 281, 1856 und Annalen der Physik und Chemie 98, 418, 1856) Ueber die spezifische Wärme einiger einfacher Körper und über die isomeren Modifikationen des Selens.

1858.

9. Matthiessen (Annalen der Physik und Chemie 104, 412, 1858) Ueber die elektromotorischen Kräfte der reinen Metalle.

1865.

10. F. Neumann (Annalen der Physik und Chemie 126, 123, 1865) Beobachtungen über die spezifische Wärme verschiedener, namentlich zusammengesetzter Körper.

1868.

11. Bettendorf und Wüllner (Annalen der Physik und Chemie 133, 293, 1868) Einige Versuche über die spezifische Wärme allotroper Modifikationen.

1869.

12. H. Fizeau (Annalen der Physik und Chemie 138, 26, 1869; Comptes rendus 68, 1125, 1869) Wärmeausdehnung verschiedener einfacher, metallischer und nichtmetallischer Körper.

1873.

13. Sale (Proceedings of the Royal Society of London 21, 283, 1873 und Annalen der Physik und Chemie 150, 333, 1873) Wirkung des Lichtes auf den elektrischen Widerstand des Selens.

14. Smith (American Journal of Science 5, 301, 1873 und Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft 6, 204, 1873) Wirkung des Lichtes auf die Leitfähigkeit des Selens.

1874.

15. G. Quincke (Annalen der Physik und Chemie, Jubelband 336, 1874) Ueber die Bestimmung des Haupteinfallswinkels und Hauptazimuts für die verschiedenen Fraunhoferschen Linien.

16. Rammelsberg (Annalen der Physik und Chemie 152, 151, 1874) Ueber die Kristallform und die Modifikationen des Selens.

17. Rosse (Philosophical Magazine and Journal of Science 47, 161, 1874) Ueber den Widerstand des Selens.

1875.

18. Adams (Proceedings of the Royal Society of London 23, 535, 1875 und Annalen der Physik und Chemie 159, 622, 1876) Ueber die Wirkung des Lichtes auf das Selen.

19. Adams (Proceedings of the Royal Society of London 24, 163, 1875 und Annalen der Physik und Chemie 159, 629, 1876) Ueber die Wirkung des Lichtes auf Tellur und Selen.

20. Rolls (Photographie News 407, 1875) Photometer.

21. W. Siemens (Berichte der Berliner Akademie der Wissenschaften 280, 1875 und Annalen der Physik und Chemie 156, 334, 1875) Ueber den Einfluß der Belichtung auf die Leitfähigkeit des Selens.

22. W. Siemens (Dinglers Polytechnisches Journal 217, 61, 1875) Elektrisches Photometer.

1876.

23. Adams und Day (Proceedings of the Royal Society of London 25, 113, 1876) Wirkung des Lichtes auf Selen.

24. Draper und Moss (Chemical News und Journal of physical Science 33, 1 und 203, 1876 und Jahresberichte der Chemie 120 und 180, 1876) Wirkung des Lichtes auf die Leitfähigkeit des Selens.

25. Gordon (Jahresberichte der Chemie 121, 1876) Einwirkung des Lichtes auf die Leitfähigkeit des Selens.

26. W. Siemens (Berichte der Berliner Akademie 95, 1876 und Annalen der Physik und Chemie 159, 117, 1876) Ueber die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit des Selens von Wärme und Licht.

1877.

27. Braun (Annalen der Physik und Chemie 1, 95, 1877) Ueber Abweichungen vom Ohmschen Gesetz in metallisch leitenden Körpern.

28. Eggoroff (Journal der physikalisch-chemischen Gesellschaft zu Petersburg 304, 1877) Versuche am Selenphotophon.

29. Forßmann (Annalen der Physik u. Chemie 2, 513, 1877) Ueber den Leitungswiderstand des Selens.

30. W. Siemens (Berichte der Berliner Akademie der Wissenschaften 299, 1877 und Annalen der Physik und Chemie 2, 521, 1877) Ueber die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit des Selens von Wärme und Licht.

1878.

31. Sabine (The Nature 17, 512, 1878 und Beiblätter zu den Annalen der Physik 2, 355, 1878) Wirkung des Lichtes auf ein galvanisches Selenelement.

32. Sabine (Philosophical Magazine 5, 401, 1878 und Beiblätter zu den Annalen der Physik 3, 434, 1879) Elektrische Versuche mit kristallinischem Selen.

33. Senlecq (Les Mondes 48, 90, 1878 und Beiblätter zu den Annalen der Physik 3, 294, 1879) Telektroskop.

1879.

34. Carey (The Scientific American 40, 309, 1879) Fernseher.

35. M. Perosino (Atti della R. Accademia della Scienze di Torino 14, 14, 1879 und Beiblätter zu den Annalen der Physik 3, 656, 1879) Telephotograph mit einem einzigen Draht.

1880.

36. G. Bell (Engineering 30, 407, 1880; Electrican 5, 214 und 220 und 237, 1880; Annales de chimie et de physique 31, 399, 1880; Fortschritte der Physik 36, 1041, 1880; Elektrotechnische Zeitschrift 1, 391, 1880) Ueber das Selen und das Photophon.

37. G. Bell (Scientific American 42, 355, 1880) Fernseher.

38 G. Bell (American Journal of Science 22, 305, 1880) Erzeugung und Wiedergabe von Tönen durch Licht.

39. G. Bell (Comptes rendus 91, 726, 1880; Beiblätter zu den Annalen der Physik 5, 142, 1881) Anwendung des Photophons zur Untersuchung der Geräusche auf der Sonnenoberfläche.

40. Le Blanc (La Lumière électrique 447, 1880) Uebertragung von Lichteindrücken.

41. Blondlot (Comptes rendus 91, 882, 1880; Beiblätter zu den Annalen der Physik 5, 199, 1881) Ueber eine neue elektrische Erscheinung des Selens.

42. Brequet (Annales de chimie et de physique 21, 560, 1880) Photophonische Selenempfänger.

43. Brequet (Comptes rendus 91, 595, 1880) Ueber die photophonischen Experimente von Bell und Tainter.

44. Linde (Photographisches Archiv 205, 1880) Phonograph.

45. Obach (Nature 22, 496, 1880; Beiblätter zu den Annalen der Physik 5, 139, 1881) Einfluß von Phosphoreszenzlicht auf Selen.

46. De Paiva, La téléscopie électrique basée sur l'emploie du selenium. Typographic de J. da Silva, Porto 1880.

47. De Paiva (La Lumière électrique 2, 398, 1880) Fernseher.

48. Perry und Ayrton (The Nature 21, 589, 1880; Beiblätter zu den Annalen der Physik 4, 490, 1880) Sehen durch Elektrizität.

49. Sawyer (La Lumière électrique 2, 267, 1880) Fernseher.
50. Senlecq (La Lumière électrique 2, 447, 1880) Telektroscop.
51. Weinhold (Elektrotechnische Zeitschrift 1, 423, 1880) Herstellung von Selenwiderständen zu Photophonzwecken.

1881.

52. Ayrton und Perry (Les Mondes 54, 518, 1881; Elektr. Rundschau 5, 1 und 16, 1888) Fernsehen.
53. Bellati und Romanese (Atti del Reale Istituto Veneto 7, 5, 1881; Beiblätter zu den Annalen der Physik 6, 116, 1882) Ueber die Schnelligkeit der Aenderung des Widerstandes des Selens bei Bestrahlung.
54. Sh. Bidwell (Philosophical Magazine 11, 302, 1881; Beiblätter zu den Annalen der Physik 5, 526, 1881) Die Wirkung der Temperatur auf den Widerstand des Selens.
55. Sh. Bidwell (The Nature 23, 344 und 563, 1881; Chemical News and Journal of physical Science 43, 104, 1881 und 44, 1 und 18, 1881; Beiblätter zu den Annalen der Physik 5, 748, 1881; Scientific American, Supplement 12, 4624, 1881) Telephotographie.
56. Sh. Bidwell (Jahresberichte der Chemie 96, 1881; The Nature 23, 58, 1881) Photophon.
57. L. Carpenter (The Nature 24, 491, 1881) Anwendung des Photophons.
58. J. W. Giltay (The Nature 25, 124, 1881) Hörbares Photometer.
59. Kalischer (Repertorium der Physik 17, 563, 1881; Der Naturforscher 14, 137, 1881) Photophon ohne Batterie.
60. Mercadier (Comptes rendus 92, 705, 1881; Beiblätter zu den Annalen der Physik 5, 747, 1881) Ueber das Selenradiophon.
61. Mercadier (Comptes rendus 92, 789, 1881; Lumière électrique 4, 295, 1881) Konstruktion der Photophonempfänger aus Selen.
62. Mercadier (Comptes rendus 92, 1407, 1881) Einfluß der Temperatur auf den Widerstand radiophonischer Selenempfänger.
63. Molera und Cebrian (Engineering 358, 1881) Konische Form der Selenzelle.
64. Du Moncell (Lumière électrique 3, 210, 1881; Electrician 6, 195, 1881 und 7, 310, 1881) Bildübertragung.
65. Moser (Philosophical Magazine 12, 212, 1881; Beiblätter zu den Annalen der Physik 5, 881, 1881) Die mikrophonische Wirkung der Selenzellen.
66. Moser (Soc. Telegr. Eng. 11. Mai 1881; Beiblätter zu den Annalen der Physik 5, 681, 1881) Selenphotophon.
67. Senlecq, Le Télectroscope. Paris, London, Newyork 1881.
68. J. Sicks (Maandbl. vor Matuurvetensch. 10, 110, 1881; Beiblätter zu den Annalen der Physik 5, 526, 1881) Ueber die Veränderung des Widerstandes des Selens.
69. Sluginoff (Journal der physikalisch-chemischen Gesellschaft Petersburg 13, 89, 1881) Ueber die galvanische Leitfähigkeit der Metalloide.
70. W. Spring (Bulletin de l'Academie Royal des Sciences de Belgique 2, 88, 1881; Beiblätter zu den Annalen der Physik 5, 854, 1881) Die Ausdehnung des Schwefels, Selens, Tellurs.
71. S. P. Thompson (Engineering 96, 1881; Philosophical Magazine 11, 286, 1881) Gebrauch konischer Spiegel zur Beleuchtung von Selenzellen.
72. S. P. Thompson (Chemical News and Journal of physical Science 43, 43, 1881) Konstruktion des Photophons.
73. Tomlinson (The Nuture 23, 457, 1881) Photophon.
74. Vidal (Moniteur de la photographie 11, 1881) Selenphotometer.

1882.

75. Perry, Die zukünftige Entwicklung der Elektrotechnik. Leipzig, Quandt & Händel, 1882.

1883.

76. F. v. Assche (Comptes rendus 97, 838 und 945, 1883) Ueber ein Mittel, die Wärmestrahlen von den Lichtstrahlen zu isolieren.

77. Sh. Bidwell (Philosophical Magazine 15, 31, 1883; Beiblätter zu den Annalen der Physik 7, 398, 1883) Widerstand von Selenzellen.

78. Fritts (American Journal of Science 26, 465, 1883; Proceedings of the American Association 33, 97, 1884; La Lumière électrique 15, 226, 1885; Electrical Review 16, 208, 1885) Lichtempfindliche Selenzelle.

79—81. Hesehus (Journal der physikalisch-chemischen Gesellschaft Petersburg 1883; drei Aufsätze); vergleiche auch Repertorium der Physik 1884 und zwar

1. Rep. d. Phys. 20, 490, 1884; Einfluß des Lichtes auf die Elektrizitätsleitung des Selens;
2. Rep. d. Phys. 20, 565, 1884; Ueber die Ursache der Veränderung der Elektrizitätsleitung des Selens unter dem Einfluß des Lichtes.
3. Rep. d. Phys. 20, 631, 1884; Ueber das Verhältnis zwischen der Lichtintensität und der Veränderung der Elektrizitätsleitung des Selens.

1884.

82. Hesehus (Journal der physikalisch-chemischen Gesellschaft Petersburg 146, 1884) Lichtempfindlichkeit des Selens.

83. Nipkow (Deutsches Reichspatent 30105 vom 6. 1. 1884) Bildübertragung.

1885.

84. Sh. Bidwell (Philosophical Magazine 20, 178, 1885; Beiblätter zu den Annalen der Physik 9, 674, 1885) Ueber die Empfindlichkeit von Selen gegen Licht.

85. Clark (Chemical News 51, 261, 1885; Jahresberichte der Chemie 249, 1885) Wirkung des Lichtes auf Selen.

86. W. Gemmil (Englisches Patent 4841 vom 20. 4. 1885) Bildübertragung.

87 Morize (Comptes rendus 100, 271, 1885) Aktinometer.

88. W. Siemens (Berichte der Berliner Akademie der Wissenschaften 6, 147, 1885; Beiblätter zu den Annalen der Physik 10, 115, 1886) Ueber die von Fritts entdeckte elektromotorische Wirkung des beleuchteten Selens.

1886.

89. Fabre (Comptes rendus 103, 53, 1886) Ueber die Kristallisationswärme des Selens.

90 Kalischer (Tageblatt der 59. Versammlung deutscher Naturforscher 124, 1886; Annalen der Physik und Chemie 31, 101, 1887) Ueber die Erregung einer elektromotorischen Kraft durch das Licht.

1887.

91. M. Bellati und S. Lussana (Gazzetta chimica Italiana 17, 391, 1887; Atti del Reale Istituto Veneto 6, 19, 1887; Beiblätter zu den Annalen der Physik 11, 818, 1887) Einfluß des Lichtes auf das Wärmeleitungsvermögen des kristallinischen Selens.

92. Kalischer (Annalen der Physik 32, 108, 1887) Ueber die Beziehung der elektrischen Leitfähigkeit des Selens zum Lichte.
93. Larroque (Der Elektrotechniker 5, 467, 1887) Bildübertragung.
94. Mercadier (Comptes rendus 105, 801, 1887) Ueber die Selenradiophonempfänger von großem Widerstand.

1888.

95. M. Bellati und L. Lussana (Atti del Reale Istituto Veneto 6, 1888, 16pp. Sep.; Beiblätter zu den Annalen der Physik 12, 268, 1888) Einige elektrische Versuche über die Seleniüre des Kupfers und Silbers.
96. Kalischer (Annalen der Physik 35, 397, 1888) Bemerkungen zu den Abhandlungen von Uljanin und Righi.
97. Righi (Studi offerti della Università Padovana alla Bolognese nell' VIII centenario 1888; Naturwissenschaftliche Rundschau 4, 236, 1888; Beiblätter zu den Annalen der Physik 12, 683, 1888) Ueber die elektromotorische Kraft des Selens.
98. Uljanin (Annalen der Physik 34, 241, 1888) Ueber die bei der Beleuchtung entstehende elektromotorische Kraft im Selen.
99. Uljanin (Annalen der Physik 35, 836, 1888) Erwiderung auf die Bemerkung des Herrn Kalischer.

1889.

100. Cornu (Comptes rendus 108, 917 und 1211, 1889) Die Brechungs- und Absorptionskoeffizienten des Selens.
101. Kalischer (Annalen der Physik und Chemie 37, 528, 1889) Ueber die elektromotorische Kraft des Selens.
102. Korda (Journal de physique 8, 231, 1889; Beiblätter zu den Annalen der Physik 14, 50, 1890) Elektrische Wirkungen des Lichtes auf das Selen.
103. Righi (Annalen der Physik und Chemie 36, 464, 1889) Ueber die elektromotorische Kraft des Selens.
104. L. Weiller (La Lumière électrique 34, 334, 1889) Fernseher.

1890.

105. Liesegang (Photographisches Archiv 302, 1890) Photophon.
106. Muthmann (Zeitschrift für Kristallographie und Mineralogie 17, 336, 1890) Untersuchungen über den Schwefel und das Selen.
107. Sutton (La Lumière électrique 38, 539, 1890) Bildübertragung.

1891.

108) Sh. Bidwell (The Electrician 26, 213, 1891; Philosophical Magazine 31, 250, 1891; Beiblätter zu den Annalen der Physik 15, 361, 1891) Einige Versuche mit Selenzellen.
109. Brillouin (Revue générale des sciences 2, 33, 1891) Fernseher.
110. Liesegang, Beiträge zum Problem des elektrischen Fernsehens 1. Aufl. Ed. Liesegangs Verlag, Leipzig (früher Düsseldorf).
111. Minchin (The Elektrician 26, 361, 1891; Philosophical Magazine 31, 207, 1891; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 15, 448, 1891) Experimente über Photoelektrizität.
112. Minchin (British Journal of Photography 38, 226, 242, 273, 1891) Bildtelegraphie.
113. Petersen (Zeitschrift für physikalische Chemie 8, 601) Ueber die allotropen Zustände einiger Elemente.

1892.

114. Minchin (Astronomy and Astrophysics 108, 702, 1892; Beiblätter zu den Annalen der Physik 17, 845, 1893) Photoelektrische Elemente.

1893.

115. Brillouin (La Lumière électrique 264, 1893) Fernseher.
116. Minchin (La Lumière électrique 48, 543, 1893; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 17, 770, 1893) Photoelektrische Elemente.
117. Pontois (The Scientific American 35, 145, 1893) Fernseher.

1894.

118. Jenkins (Cosmos 29, 161, 1894) Fernseher.
119. Majorana (Rendiconti della Regia Accademia dei Lincei 3, 183, 1894; Beiblätter zu den Annalen der Physik 18, 930, 1894) Ueber die Geschwindigkeit der photoelektrischen Erscheinungen des Selens.
120. Majorana (L'Elettricista 3, 3, 1894) Bildzerlegung.
121. Rabourdin (Cosmos 28, 361 1894) Fernseher.

1895.

122. R. Berglund (Englisches Patent 4357 vom 30. 3. 1895) Bildübertragung.
123. Sh. Bidwell (Philosophical Magazine 40, 233, 1895; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 19, 899, 1895) Die elektrischen Eigenschaften des Selens.
124. Sh. Bidwell (Der Mechaniker 232, 1895) Telephotograph.
125. Carey (The Electrical Engineer 16, 57, 1895) Telephotograph.
126. Minchin (Proceedings of the Royal Society of London 58, 142, 1895; The Nature 52, 248, 1895; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 19, 889, 1895) Anwendung des Selens auf Photometrie.
127. W. Nyström (Deutsches Reichspatent 94 306 vom 11. 1. 1895) Bildübertragung.

1896.

128. V. Blumencron und Schöffler (Englisches Patent 29 227 vom 19. 12. 1896) Phototelegraphie.
129. J. W. Giltay (The Nature 54, 109, 1896) Röntgenstrahlen und der Widerstand des Selens.
130. Majorana (Rendiconti della Regia Accademia dei Lincei 5, 45, 1896; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 20, 558, 1896) Wirkung eines periodisch unterbrochenen Lichtstrahles auf das Selen.

1897.

131. Schmidt (Annalen des Physik und Chemie 62, 407, 1897) Elektrische Erscheinungen in Selen und Flußphat.
132. Szczepanik (Englisches Patent 5031 vom 24. 2. 1897; Zeitschrift d. Ver. d. Ing. 43, 1139, 1899) Fernseher.

1898.

133. Agostini (Il Nuovo Cimento Periodico di fisica 8, 81, 1898; Fortschritte der Physik 592, 1898) Einfluß elektromagnetischer Wellen auf die elektrische Leitfähigkeit kristallinischen Selens.

134. Dussaud (Comptes rendus 126, 1132, 1898) Uebertragung der Veränderungen eines Lichtstrahlenbündels mittels eines elektrischen Leitungsdrahtes.

135. Dussaud (Comptes rendus 127, 417, 1898; The Scientific American Supplement 46, 18793, 1898) Bildübertragung.

136. Forkarth (Deutsches Reichspatent 125 349 vom 27. 10. 1898) Bildtelegraphie.

137. Schöffler, Die Phototelegraphie und das elektrische Fernsehen. Wien, W. Braumüller, 1898.

138. Silberstein, Pollak und Viragh (Deutsches Reichspatent vom 24. 7. 1898; Englisches Patent 16 814 vom 2. 6. 1899) Bildtelegraphie.

139. M. Tietz (Elektrotechnische Zeitschrift 562, 1898) Die Abstimmung bei der Funkentelegraphie ohne Fritter (Lichtrelais).

1899.

140. Dussaud (Comptes rendus 128, 171, 1899; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 23, 266, 1899) Uebertragung der Töne durch ultraviolette Strahlen.

141. Liesegang, Beiträge zum Problem des elektrischen Fernsehens. 2. Auflage. Ed. Liesegang Verlag, Leipzig.

142. Perreau (Comptes rendus 129, 956, 1899; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 24, 135, 1900) Einfluß der X-Strahlen auf den elektrischen Widerstand des Selens.

143. Poliakoff (Deutsches Reichspatent 117 599 [57c] 1899) Verwendung des Selens zur Photographie.

1900.

144. Clausen und v. Bronk, Neue Erscheinungen auf dem Gebiete der Physik. Berlin, Selbstverlag.

145. Himstedt (Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg i. Br XI, 126, 1900; Annalen der Physik 4, 531, 1901) Ueber einige Versuche mit Becquerel- und Röntgenstrahlen.

146. A. C. Longden (American Journal of Science 10, 55, 1900; Beiblätter zu den Annalen des Physik und Chemie 24, 1137, 1900) Ueber Interferenzringe in Niederschlägen aus Selen.

147. Saunders (The Journal of Physical Chemistry 4, 423, und Chemisches Centralblatt II. 807, 1900) Die allotropen Formen des Selens.

1901.

148. Bloch (Comptes rendus 132, 914, 1901; Chemisches Centralblatt 1, 1078, 1901) Wirkung der Radiumstrahlen auf das Selen.

149. O v. Bronk (Der Mechaniker 9, 13, 1901) Ueber ältere und neuere Fernseherkonstruktionen mit besonderer Berücksichtigung des Selen-Bilder-Phototelegraphen.

150. J. W. Giltay (Physikalische Zeitschrift 675, 1901) Apparate zur Demonstration der Lichtempfindlichkeit des Selens.

151. J. W. Giltay (Der Mechaniker 9, 243, 1901) Apparate zum Nachweis der Lichtempfindlichkeit des Selens und zur Demonstration des Photophons.

152. Massini (L'Eclairage électrique 29, 68, 1901; Il Nuovo Cimento Periodico di fisica 1, 358, 1901; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 25, 1015, 1901) Ueber den angeblichen Einfluß der elektromagnetischen Wellen auf den elektrischen Widerstand des Selens.

153. E. Ruhmer (Elektrotechnische Zeitschrift 22, 196, 1901) Der sprechende elektrische Flammenbogen und seine Verwendung zur drahtlosen Telephonie.

154. E. Ruhmer (Physikalische Zeitschrift 2, 325, 1901) Ueber das sprechende Licht.

155. E. Ruhmer (Physikalische Zeitschrift 2, 339, 1901) Neue Sende- und Empfangsanordnung für drahtlose Telephonie.

156. E. Ruhmer (Physikalische Zeitschrift 2, 468, 1901) Briefkastennotiz.

157. E. Ruhmer (Physikalische Zeitschrift 2, 498, 1901) Das Photographophon.

158. E. Ruhmer (Der Mechaniker 9, 2, 1901) Simon's Photophonie.

159. E. Ruhmer (Der Mechaniker 9, 13, 1901) Ueber ältere und neuere Fernsehkonstruktionen mit besonderer Berücksichtigung des Selen-Bilder-Phototelegraphen von O. v. Bronk.

160. E. Ruhmer (Der Mechaniker 9, 41, 1901) Ueber die Anfertigung lichtempfindlicher Selenzellen.

161. E. Ruhmer (Der Mechaniker 9, 88, 1901) Neues vom sprechenden Licht und der Lichttelephonie.

162. R. v. Seydlitz (Physikalische Zeitschrift 2, 380, 1901) Briefkastennotiz.

163. H. Th. Simon (Physikalische Zeitschrift 2. 253, 1901) Ueber den sprechenden Flammenbogen und seine Verwendung zu einer Telephonie ohne Draht.

164 H. Th. Simon (Elektrotechnische Zeitschrift 22, 510, 1901) Tönende Flammen und Flammentelephonie.

1902.

165. O. v. Bronk (Deutsches Reichspatent 155 528 vom 12. 6. 1902) Fernseher.

166. E. und O. Buß (Französisches Patent 319 425 vom 8. 3. 1902) Bildtelegraphie.

167. Coblyn (Comptes rendus 135, 684, 1902; L'Eclairage électrique 33, 533, 1902; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 27, 589, 1903) Elektrisches Fernsehen.

168. A. Korn (Sitzungsberichte der Kgl. Bayerischen Akademie der Wissenschaften 37, 39, 1902) Ueber ein Verfahren der elektrischen Fernphotographie.

169. A. Korn Elektrotechnische Zeitschrift 23, 454, 1902; Deutsches Reichspatent 136 876 vom 4. 1. 1902) Ueber einen Apparat zur Herstellung von elektrischen Fernphotographen.

170. A. Pochettino (Rendiconti della Regia Accademia dei Lincei 11, 286, 1902; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 27, 854, 1903) Ueber den Einfluß niedriger Temperaturen auf die Widerstandsänderung des Selens durch das Licht.

171. Chr. Ries (Dissertation, Erlangen 1902; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 27, 1101, 1903) Das elektrische Verhalten des kristallinischen Selens gegen Wärme und Licht.

172. E. Ruhmer (Elektrotechnische Zeitschrift 23, 859, 1902) Neuere Versuche mit Lichttelephonie.

173. E. Ruhmer (Physikalische Zeitschrift 3, 468, 1902; Der Mechaniker 10, 188, 1902) Ueber die Empfindlichkeit und Trägheit von Selenzellen.

174. E. Ruhmer (Physikalische Zeitschrift 3, 532, 1902) Zylindrische lichtempfindliche Selenzelle.

175. E. Ruhmer (Technische Rundschau des Berliner Tageblatts 339, 1902; Elektrochemische Zeitschrift 9, 98, 1902) Eine neue lichtempfindliche Zelle.

176. E. Ruhmer (Der Mechaniker 10, 185, 1902) Ueber Telautographen mit besonderer Berücksichtigung des Gruhn'schen Kopiertelegraphen und des Korn'schen Fernphotographen.

177. E. Ruhmer, Das Selen und seine Bedeutung für die Elektrotechnik mit besonderer Berücksichtigung der drahtlosen Telephonie. Verlag der Administration „Der Mechaniker", Nikolassee b. Berlin.

178. Semat (Französisches Patent 321 876 vom 7. 6. 1902; 322 222 vom 18. 6. 1902; 331 314 vom 16. 4. 1903) Bildübertragung.

179. Th. Simon und Reich (Physikalische Zeitschrift 3, 278, 1902) Tönende Flammen und Flammentelephonie.

180. Wood (Philosophical Magazine 3, 607, 1902) Absorption, Dispersion und Brechung des Selens.

1903.

181. Anzel (Zeitschrift für Elektrochemie 9, 595, 1903) Ueber die Aenderungen des elektrischen Widerstandes unter dem Einfluß von Licht auf Stoffe außer Selen.

182. Aubel (Comptes rendus 136, 1189, 1903; Physikalische Zeitschrift 4, 808, 1903) Ueber das elektrische Leitvermögen des Selens unter der Einwirkung von mit Ozon behandelten Körpern.

183. Aubel (Comptes rendus 136, 929, 1903; Physikalische Zeitschrift 4, 807, 1903) Ueber den Einfluß der radioaktiven Körper auf das elektrische Leitvermögen des Selens.

184. O. Dony-Hénault (Bulletin de la Société chimique de Belgique, Oktober 1903) Ueber die Radioaktivität von H_2O_2.

185. J. W. Giltay (Physikalische Zeitschrift 4, 287, 1903) Verbesserte Apparate zur Demonstration der Lichtempfindlichkeit des Selens.

186. Griffiths (Comptes rendus 137, 647, 1903; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 28, 876, 1904) Aenderung des elektrischen Widerstandes des Selens unter dem Einfluß gewisser Substanzen.

187. Hammer (Transactions of American Institute of Electrical Engineers 20, 541, 1903; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 28, 50, 1904) Die Eigenschaften und Anwendungen des Selens.

188. Hesehus (Journal der Russischen physikalisch-chemischen Gesellschaft 35, 661, 1903) Abhängigkeit der Elektrizitätsleitung des Selens von der Belichtung.

189. Hopius (Journal des Russischen physikalisch-chemischen Gesellschaft 35, 581, 1903 und Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 28, 723, 1904) Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit des Selens von dem Beleuchtungsgrad.

189a. Knothe (Elektrotechnische Rundschau 21, 23, 1903) Lichtempfindlichkeit des Selens.

190. A. Korn (Comptes rendus 136, 1190, 1903) Elektrische Bildtelegraphie.

191. Lux, Elektrischer Fernseher. Ludwigshafen, A. Schönsiegel, 1903. (Vergl. auch Bayerisches Industrie- und Gewerbeblatt 38, 13, 1906).

192. R. Marc (Zeitschrift für anorganische Chemie 37, 459, 1903) Ueber das Verhalten des Selens gegen Licht und Temperatur.

193. Nutting (Physikalische Zeitschrift 4, 201, 1903) Das Reflexionsvermögens von Selenium.

194. F. Re (L'Eclairage électrique 35, 215, 1903) Bildübertragung

195. E. Ruhmer (Der Mechaniker 11, 265, 1903) Neue Selenapparate.

196. Semat (Französisches Patent 331 314 von 16. 4. 1903) Bildtelegraphie.

197. Schneider (Western Electrician 32, 188, 1903) Phototelegraph.
198. Schulz (Deutsches Reichspatent 158097 vom 27. 10. 1903) Bildübertragung.

1904.

199. Amaduzzi, Il Selenio, Bologna, Nic. Zanichelli Verlag; Physikalische Zeitschrift 5, 647, 1904.
200. Belin (Deutsches Reichspatent 173783 vom 9. 12. 1904) Bildübertragung.
201. Berndt (Der Mechaniker 12, 97, 1904) Selenzellen auf Kohle.
202. Berndt (Physikalische Zeitschrift 5, 121, 1904) Einige Beobachtungen an Selenzellen.
203. Berndt (Physikalische Zeitschrift 5, 289, 1904) Die Einwirkung von Selenzellen auf die photographische Platte.
204. Berthier (L.Eclairage électrique 38, 441, 1904; Beiblätter zu den Analen der Physik und Chemie 28, 876, 1904) Ueber die photoelektrischen Eigenschaften des Selens.
205. Biltz (Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften, Göttingen, 18, 1904) Ueber das Verhalten einiger anorganischer Celloide zur Faser in seinen Beziehungen zur Theorie des Färbevorgangs.
206. Chabot (Physikalische Zeitschrift 5, 103 und 168, 1904) Neue Strahlen oder eine neue Emanation.
207. Chabot (Physikalische Zeitschrift 5, 517 und 584, 1904) Eine neue Radiation oder eine neue Emanation.
208. Davis (The Nature 70, 506, 1904; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 29, 579. 1905) Ist Selen radioaktiv?
209. Fortong (Deutsches Reichspatent 179548 vom 4. 10. 1904) Bildübertragung.
210. Jaworski und Frankenstein (Deutsches Reichspatent 172376 vom 20. 8. 1904) Phototelegraph.
211. A. Korn (Physikalische Zeitschrift 5, 113, 1904) Ueber Gebe- und Empfangsapparate zur elektrischen Fernübertragung.
212. A. Korn (Physikalische Zeitschrift 5, 164, 1904) Empfangsapparate für Telautographie und Fernübertragung von Halbtongravüren.
213. A. Korn, Elektrische Fernphotographie und Aehnliches. 1. Aufl. S. Hirzel Verlag, Leipzig.
214. Nisco (L'Eclairage électrique 30. April 1904) Photometer.
215. Pfund (Philosophical Magazine 7, 26, 1904; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 29, 792, 1905) Eine Studie über die Selenzelle.
216. Reiff (Der Mechaniker 12, 75, 86 und 100, 1904) Die telegraphische Uebertragung von Bildern und Schriftzügen, System Korn.
217. Ribbe (Deutsches Reichspatent 160813 vom 19. 4. 1904) Bildübertragung.
218. E. Ruhmer (Elektrotechnische Zeitschrift 25, 1021, 1904) Ueber das Selen und seine Bedeutung für die Elektrotechnik.
219. Stephan (Schulprogramm des Gymnasiums in Dramburg 1903; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 28, 447, 1904) Konstruktion und Theorie eines elektrischen Fernsehers.

1905.

220. Aichi und Tanakadate (Tokyo Sugaku Butsurigaku Kano Kiji 2, 217, 1905; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 29, 997, 1905). Der Einfluß der Temperatur auf das elektrische Leitvermögen des Selens.

221. Belin (Englisches Patent 13 470 vom 27. 7. 1905; Deutsches Reichspatent 182 052 vom 28. 1. 1907; vergl. auch Elektrotechnischer Anzeiger 24, 376, 1907) Bildübertragung.

222. Carbonnelle (Französisches Patent 357 009 vom 17. 8. 1905; Deutsches Reichspatent 179 668 vom 20. 8. 1905) Bildübertragung.

223. Carpini (Rendiconti della Regia Accademia dei Lincei 14, 667, 1905; Physikalische Zeitschrift 7, 306, 1906) Ueber den photoelektrischen Effekt am Selen.

224. Chabot (Physikalische Zeitschrift 6, 37 und 619, 1905) Neue Strahlen oder eine neue Emanation.

225. Coste (Comptes rendus 141, 715, 1905; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 30, 634, 1906) Ueber die elektrische Leitfähigkeit von Selen.

226. Courvoisier (Astronomische Nachrichten 167, 218, 1905; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 29, 1039, 1905) Anwendung einer Selenzelle zur Herstellung eines Sekundenkontaktes bei Pendeluhren.

227. J. W. Giltay (Der Mechaniker 13, 280, 1905) Neue Selenzellenform.

228. J. W. Giltay (Elektrotechnische Zeitschrift 26, 313, 1905) Selenzellen im luftleeren Raum.

229. Hesehus (Journal der Russischen physikalisch-chemischen Gesellschaft 37, 221, 1905; Physikalische Zeitschrift 7, 163, 1906) Ueber die Lichtempfindlichkeit des Selens.

230. A. Korn (Elektrotechnische Zeitschrift 26, 1131, 1905) Elektrische Fernphotographie.

231. Monasch (Deutsches Reichspatent 172 197 [42 h], 1905) Lichtmessung.

232. E. Ruhmer (Der Mechaniker 13, 252, 1905) Neue Selenzellenform.

233. E. Ruhmer (Der Mechaniker 13, 280, 1905) Erwiderung.

234. Weidert (Dissertation, Rostock 1905; Annalen der Physik und Chemie 18, 811, 1905) Ueber den Einfluß der Belichtung auf die thermoelektrische Kraft des Selens.

235. O. Weigel (Dissertation, Göttingen 1905; Neues Jahrbuch für Mineralogie, Beilage 21, 325, 1906) Beiträge zur Kenntnis fester unipolarer Leiter.

236. Wulf und Lucas (Physikalische Zeitschrift 6, 838, 1905) Zwei Beobachtungen mittels Selenzellen bei der totalen Sonnenfinsternis.

1906.

237. Albrecht (Deutsches Reichspatent 189 551 [42 h] 1906) Selenphotometer.

238. H. Brandes (Elektrotechnische Zeitschrift 27, 1015, 1906) Ueber Abweichungen vom Ohmschen Gesetz, Gleichrichterwirkung und Wellenanzeiger der drahtlosen Telegraphie.

239. v. Bronk (Physikalische Zeitschrift 7, 281, 1906) Briefkastennotiz.

240. v. Bronk (Physikalische Zeitschrift 7, 431, 1906) Briefkastennotiz.

241. Bumb (Deutsches Reichspatent 191 075 [42 h], und 196 170 [42 h] 1906) Lichtmessung mit Selen.

242. Coste (Comptes rendus 143, 822, 1906; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 32, 96, 1908) Ueber das elektrische Leitvermögen des Selens.

243. Frikart (Deutsches Reichspatent 190 464 vom 9. 12. 1906) Drahtlose Bildübertragung.

244. J. W. Giltay (Verhandlungen der Amsterdamer Akademie 1906, 1. Sekt. 9, Nr. 3; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 31, 845, 1907) Experimentaluntersuchung über die Möglichkeit einer Doppeltelephonie mittels unterbrochener Klänge.

245. Hoecken (Deutsches Reichspatent 177 065 [42 h] 1906) Selenphotometer.

246. A. Korn (Deutsches Reichspatent 180 219 vom 12. 1. 1906) Relaisanordnung.

247. A. Korn (Comptes rendus 143, 892, 1906; Französisches Patent 363 390 vom 2. 5. 1906) Der Selenkompensator.

248. Liebreich (Deutsches Reichspatent 190 462 vom 5. 5. 1906; vergl. auch Deutsches Reichspatent 192 288 und 210 824) Bildtelegraphie.

249. Lux (Bayerisches Industrie- und Gewerbeblatt 38, 13, 1906) Bildübertragung.

250. R. Marc (Zeitschrift für anorganische Chemie 48, 393, 1906) Ueber das Verhalten des Selens gegen Licht und Temperatur.

251. R. Marc (Zeitschrift für anorganische Chemie 50, 446, 1906) Ueber das Verhalten des Selens gegen Licht und Temperatur.

252. R. Marc (Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft 39, 697, 1906) Notiz zur Kenntnis der allotropen Formen des Selens.

253. Pochettino und Trabacchi (Rendiconti della Regia Accademia dei Lincei 15, 27, 1906; Il Nuovo Cimento Periodico di fisica 12, 335, 1906; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 32, 93, 1908) Ueber das Verhalten des Selens gegen Wechselströme.

254. Reinganum (Physikalische Zeitschrift 7, 786, 1906) Eine neue Anordnung der Selenzellen.

255. Rignoux (Französisches Patent 364 189 vom 10. 2. 1906) Fernsehen.

256. E. Ruhmer (Physikalische Zeitschrift 7, 430, 1906) Briefkastennotiz.

257. G. W. Ruhmer (Deutsches Reichspatent 197 385 [42 h] und 198 290 [42 h] 1906) Lichtmessung mit Selen.

258. Schrott (Berichte der Kaiserl. Akademie der Wissenschaften zu Wien 115, II. Abt. 1031, 1906; Physikalische Zeitschrift 8, 42, 1907) Das elektrische Verhalten der allotropen Selenmodifikationen unter dem Einfluß von Wärme und Licht.

259. Stephan (Der Mechaniker 14, 159 und 173, 1906) Konstruktion eines elektrischen Fernsehers.

260. Torda (The Electrician 56, 1042, 1906; Elektrotechnische Zeitschrift 27, 729, 1906; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 31, 11, 1907) Selenphotometer.

261. Vogler (Der Mechaniker 14, 147, 1906; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 30, 1068, 1906) Herstellung einer Selenzelle und eines Apparates zum Nachweis der Lichtempfindlichkeit.

1907.

262. Adamian (Deutsches Reichspatent 197 443 vom 28. 3. 1907; Deutsches Reichspatent 197 183 vom 12. 7. 1907) Bildübertragung.

263. G. Allström (Elektrotechnische Zeitschrift 28, 1131 und 1240, 1907) Selenrelais für Telegraphie.

264. Ch. G. Barkla (Jahrbuch d. Radioaktivität und Elektrotechnik 5, 246, 1908) Der Stand der Forschung über die sekundäre Röntgenstrahlung.

265. R. Bellini (Centralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie. 611, 1907) Spuren von Selen auf der Vesuvlava von 1916.

266. Sh. Bidwell (The Nature 76, 444, 1907) Praktische Telephotographie.

267. Sh. Bidwell (The Nuture 77, 222, 1907; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 32, 610, 1908) Die photoelektrischen Eigenschaften des Selens.

268. O. v. Bronk (Elektrotechnische Zeitschrift 28, 1240, 1907) Selenrelais.

269. F. C. Brown und J. Stebbins (The Physical Review 25, 501, 1907; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 32, 1061, 1908) Ueber die Veränderung der Lichtempfindlichkeit des Selens durch Druck.

270. F. C. Brown und J. Stebbins (The Physical Review 25, 505, 1907; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 32, 1061, 1908) Einfluß der Radiumstrahlung auf den Widerstand der Selenzellen.

271. Buckney und Jones (The Electrician 60, 211, 1907) Ein neues Selenphotometer.

272. B. Glatzel (Deutsche Mechaniker-Zeitung 189, 197, 209, 1907; Elektrotechnische Zeitschrift 28, 809, 1907; Verkehrstechnische Woche 1907) Das Selen und seine Anwendung in der Fernphotographie.

273. B. Glatzel (Verkehrstechnische Woche Nr. 45 1907) Die Korn'sche Fernphotographiestation in der Allgem. Ausstellung von Erfindungen der Klein-Industrie in Berlin.

274. Haub (Der Mechaniker 15, 75, 1907) Ein neues Selen-Photometer.

275. Kleinberg & Co., M. Schlechter (Deutsches Reichspatent 193 170 [42 h] 1907) Selenphotometer.

276. A. Korn (Physikalische Zeitschrift 8, 18, und 19, 1907) Ein Lichtrelais. Der Selenkompensator und seine elementare Theorie.

277. A. Korn (Physikalische Zeitschrift 8, 118, 1907) Ueber eine neue Methode der elektrischen Fernphotographie.

278. A. Korn (Elektrotechnische Zeitschrift 28, 808, 1907) Ueber die Versuche mit Bildtelegraphie zwischen München und Berlin.

279. A. Korn (Zeitschrift für Schwachstromtechnik 463, 1907) Fortschritte der Bildtelegraphie.

280. A. Korn, Elektrische Fernphotographie und Aehnliches, 2. Aufl. Verlag von Hirzel, Leipzig, 1907.

281. R. Marc (Zeitschrift für anorganische Chemie 53, 298, 1907) Ueber das Verhalten des Selens gegen Licht und Temperatur.

282. R. Marc, Die physikalisch-chemischen Eigenschaften des metallischen Selens. Verlag von Leopold Voß, Hamburg 1907.

283. E. Merritt (The Physical Review 25, 502, 1907; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 32, 1061, 1908) Die Erholung von Selenzellen, die dem Lichte ausgesetzt waren.

284. Minchin (The Nature 77, 173, 1907; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 32, 610, 1908) Die photoelektrischen Eigenschaften des Selens.

285. Moß (The Nature 77, 198, 1907; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 32, 610, 1908) Die photoelektrischen Eigenschaften des Selens.

286. Nisco (Zeitschrift für Schwachstromtechnik 253, 1907; Prometheus 18, 357, 1907) Fernsehen mittels Elektrizität.

287. Pochettino und Trabacchi (Il Nuovo Cimento Periodico di fisica 13, 29, 1907; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 31, 1128, 1907) Weitere Untersuchungen über das elektrische Verhalten des Selens.

288. E. Presser (Deutsches Reichs-Gebrauchsmuster 312 022 vom 3. 6. 1907; Elektrotechnische Zeitschrift 28, 560, 571, und 703, 1907) Die Anwendung des Selens zu photometrischen Messungen.

289. Reinganum (Physikalische Zeitschrift 8, 293 und 392, 1907) Beitrag zu einer elektrolytischen Selenzelle. (Berichtigung).

290. P. v. Schrott (Elektrotechnische Zeitschrift 28, 293 und 571, 1907) Anwendung des Selens zu photometrischen Messungen.

291. Senlecq (The Scientific American, Supplement 64, 372, 1907) Fernseher.

292) M. Sperling (Dissertation, Göttingen 1907; Hessische Jahrbücher für Natur und Heilkunde 1908) Beiträge zur Kenntnis der Selenzellen.

293. J. Stebbins und F. Brown (The Astrophysical Journal 26, 326, 1907; The Nature 77, 302, 1908) Eine Bestimmung des Mondlichts mit einem Selenphotometer.

294. Weidhaas (Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht 20, 93, 1907; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 31, 951, 1907) Einfache Versuche zur Demonstration der Lichttelephonie.

295. Will (Elektrotechnischer Anzeiger 24, 115, 127 und 141, 1907) Fortschritte der elektrischen Bildtelegraphie.

1908.

296. E. Albrecht (Der Mechaniker 16, 65, 1908) Selenphotometer.

297. L. Amaduzzi (Rendiconti della Regia Accademia dei Lincei 17, 590, 1908; Annalen der Physik und Chemie 33, 96, 1909) Ueber die Emission von belichteten kristall. Selen.

298. Armangaud (The Nature 36, 390, 1908) Fernseher.

299. G. Athanasiadis (Annalen der Physik und Chemie 25, 92, 1908) Das Verhältnis der Beleuchtung zum Leitvermögen des Selens.

300. G. Athanasiadis (Annalen der Physik und Chemie 27, 890, 1908) Wirkung der Röntgenstrahlung auf den elektrischen Widerstand des Selens.

301. F. Bernochi (Englisches Patent 11416 vom 31. 3. 1908; Deutsches Reichspatent 214472 vom 1. 4. 1908) Drahtlose Bildübertragung.

302. Sh. Bidwell (The Nature 78, 105, 1908) Telegraphische Photographie und elektrisches Fernsehen.

303. E. Branly (Comptes rendus 147, 124, 1908; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 33, 925, 1909) Bemerkungen zu der Mitteilung von C. Tissot.

304. F. C. Brown und Stebbins (The Physical Review 26, 273, 1908; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 33, 220, 1909) Studien über die Aenderung des elektrischen Widerstandes von Selenzellen.

305. O. und A. Dony-Hénault (Bulletin de la Société chimique de Belgique 22, 224, 1908) Ueber die photographische Wirkung von H_2O_2.

306. W. S. Gripenberg (Physikalische Zeitschrift 9, 519, 1908) Ueber die Anwendung von Selendampf zur Herstellung von lichtempfindlichen Zellen.

307. A. Korn (Deutsches Reichspatent 211836 vom 23, 12, 1908) Bildübertragung.

308. F. Montén (Archiv for Matematik, Astronomi och Fysik 4, 1, 1908; Dissertation Upsala 1909; Beiblätter zu den Annalen der Physik 33, 628, 1909) Ueber den Einfluß des Druckes auf den elektrischen Widerstand des Selens und Schwefelsilbers.

309. R. J. Moß, G. M. Minchin, Sh. Bidwell (The Nature 77, 198 und 222, 1908) Die photoelektrischen Eigenschaften des Selens.

310. G. Pellini und Pedrina (Rendiconti della Regia Accademia dei Lincei 17, II. Sem. 78, 1908 und Gazetta chimica Italiana 39, 35, 1909) Selen und Jod.

311. A. Pochettino (Il Nuovo Cimento Periodico di fisica 16, 381, 1908; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 33, 993, 1909) Ueber den sekundären Strom der Selenpräparate.

312. Ribbe (Zeitschrift für Elektrochemie 14, 777, 1908) Selenzellen mit unterhalb der einheitlich in sich geschlossenen Selenschicht liegenden Leitern.

313. Chr. Ries (Physikalische Zeitschrift 9, 164, 1908) Lichtempfindlichkeit des Selens.

314. Chr. Ries (Physikalische Zeitschrift 9, 228, 1908) Entgegengesetztes Verhalten des Selens.

315. Chr. Ries (Physikalische Zeitschrift 9, 569, 1908) Einfluß der Feuchtigkeit auf die elektrischen Eigenschaften des Selens.

316. Chr. Ries, Die elektrischen Eigenschaften des Selens und seine Bedeutung für die Elektrotechnik. I. Aufl. Berlin-Nikolassee, F. und M. Harrwitz, 1908.

317. S. Saeland (Annalen der Physik und Chemie 27, 903, 1908) Ueber die sogenannte Metallstrahlung.

318. E. Schlesser (Deutsche Uhrmacherzeitung 32, 144, 1908) Sekundenpendel und Selenkontakt.

319. Stephan (Deutsches Reichspatent 214473 vom 27. 2. 1908) Fernseher.

320. C. Swinton (The Nature 78, 151, 1908) Elektrisches Fernsehen.

321. C. Tissot (Soc. franç. d. phys. No. 275, 6, 1908; Annalen der Physik und Chemie 32, 1073, 1908) Anruf mit elektrolytischem Detektor und Selenzelle.

322. C. Tissot (Comptes rendus 147, 37, 1908; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 33, 924, 1909) Ueber den Gebrauch empfindlicher Detektoren für elektrische Schwingungen, welche auf thermoelektrischen Wirkungen beruhen.

323. Société anonyme: le matin Paris (Der Mechaniker 16, 5, 1908 und Französisches Patent 376904) Der Telegraveur.

1909.

324. L. Amaduzzi (Il Nuovo Cimento Periodico di fisica 18, 58, 1909; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 34, 376, 1910) Beobachtungen über das Selen im magnetischen Felde.

325. Gebr. Andersen (Deutsches Reichspatent 233688 vom 19. 12. 1909) Fernseher.

326. F. Bonola und G. Cavino (Il Nuovo limento Periodico di fisica 17, 95, 1909; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 33, 1333, 1909) Anwendung der Widerstandsänderung des Selens zur Untersuchung der N-Strahlungen.

327. v. Chiarini (Rendiconti della Regia Accademia dei Lincei 18, 246, 1909; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 33, 876, 1909) Ueber einige elektrische Eigenschaften von Selen.

328. M. Coste (Comptes rendus 149, 674, 1909; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 34, 525, 1910) Ueber die Umwandlungen des Selens.

329. L. S. Mc. Dowell (The Physical Review 29. 1. 1909; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 34, 490, 1910) Einige elektrische Eigenschaften des Selens.

330. L. Dubois (The Electrician 62, 570 und 644, 1909) Der Apparat von Korn zur Uebermittlung von Photographien.

331. W. S. Gripenberg (Physikalische Zeitschrift 10, 957, 1909) Ueber die Kristallisation dünner Selenplatten.

332. W. S. Gripenberg (Elektrotechnische Zeitschrift 30, 495, und 885, 1909) Ueber eine Druckkontakt-Selenzelle.

333. A. Korn (Naturforscher-Vers. in Salzburg 1909; Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 11, 436, 1909; Physikalische Zeitschrift 10, 793, 1909) Untersuchungen über die Herabsetzung der Trägheit von Selenzellen mit Hilfe der Kompensationsmethode.

334. A. Korn (Deutsches Reichspatent 233 213 vom 5. 12. 1909) Bildübertragung.

335. H. R. Kruyt (Zeitschrift für anorganische Chemie 64, 305, 1909) Die dynamische Allotropie des Selens.

335a. W. Meier (Dissertation, Göttingen 1909; Annalen der Physik 31, 1017, 1910) Untersuchungen über Dispersion und Absorption bei Metallen.

336. A. H. Pfund (Physikalische Zeitschrift 10, 340, 1909 und The Physical Review 28, 324, 1909) Die elektrischen und optischen Eigenschaften des metallischen Selens.

337. A. Pochettino (Rendiconti della Regia Accademia dei Lincei 18, II. Sem., 445, 1909; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 34, 658, 1910) Ueber das Verhalten der gewöhnlichen Selenzelle gegen Wechselstrom.

338. A. Pochettino (Atti del Reale Accademia dei Lincei 18, 449, 1909; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 33, 1170, 1909) Ueber die Umwandlung des Selens.

339. E. Presser (Deutsches Reichspatent 219 574 vom 18. 2. 1909 und Deutsches Reichs- Gebrauchs-Muster 408 286 vom 28. 12. 1909) Selenzelle; ferner (Schweizerische Elektrotechnische Zeitschrift 396, 1909) Neuere Fortschritte auf dem Gebiete der Selenphotometrie.

340. Rignoux und Fournier (L'Illustration 451, 1909) Fernseher.

341. Chr. Ries, Das Licht in seinen elektrischen und magnetischen Wirkungen (Wissen und Können Bd. 11) Leipzig, Joh. Ambr. Barth, 1909.

342. Chr. Ries (Physikalische Zeitschrift 10, 54, 1909) Ueber die Anwendung von Selendampf zur Herstellung von lichtempfindlichen Zellen.

343. E. Ruhmer (Zeitschrift für Schwachstromtechnik 3, 393, 1909; Der Mechaniker 17, 145, 1909) Der elektrische Fernseher.

344. v. Salviati (Elektrotechnische Zeitschrift 30, 885, 1909) Druckkontakt-Selenzelle.

1910.

345. L. Amaduzzi (Rendiconti dell' Accademia Bologna 14, 31, 1910) Der Hallwachseffekt am kristallinischen Selen.

346. Gebr. Andersen (Zeitschrift für Schwachstromtechnik 4, 452, 1910; Der Mechaniker 18, 160, 1910; Elektrotechnische Zeitschrift 32, 1038, 1911) Fernseher.

347. F. C. Brown (Physikalische Zeitschrift 11, 481, 1910) Selenzellen von hoher Empfindlichkeit.

348. F. C. Brown (Physikalische Zeitschrift 11, 482, 1910) Eine neue lichtelektrische Eigenschaft am Selen.

349. E. Dafah (Modern Electrics 3, 496, 1910; Elektrotechnische Zeitschrift 32, 66, 1911) Alarmvorrichtung mit Selenzelle.

350. M. Dosai (Der Mechaniker 18, 54, 1910) Ein neuer Vorschlag zur Lösung des Fernseherproblems.

351. L. S. Mc. Dowell (The Physical Review 30, 474, 1910; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 34, 970, 1910) Die Erholung der Selenzellen nach Erregung mittels X-Strahlen.

352. L. S. Mc. Dowell (The Physical Review 31, 524, 1910; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 35, 369, 1911) Der Einfluß der Temperatur auf die Erholung.

353. J. W. Giltay (Physikalische Zeitschrift 11, 419, 1910) Selenzelle mit erhöhter Ausnützung des Lichtes.

354. Br. Glatzel (Elektrotechnische Zeitschrift 31, 1062 und 1092, 1910) Neue Versuche über Fernübertragung von Bildern.

355. W. S. Gripenberg (Physikalische Zeitschrift 11, 132, 1910) Selenzellen mit erhöhter Ausnützung des Lichtes.

356. W. S. Gripenberg (Physikalische Zeitschrift 11, 420, 1910) Zum Problem des elektrischen Fernsehens.

357. A. Korn (Fortschritte der naturwiss. Forschung 1, 177, 1910) Die Entwicklung der Bildtelegraphie.

358. W. Kuhlmann (Der Mechaniker 18, 146, 1910) Neue Wege zum automatischen photographischen Registrieren des Gewichtsverlustes einer Substanz.

359. J. Luterbacher (Annalen der Physik und Chemie 33, 1392, 1910) Der Einfluß der elektromotorischen Kraft auf den elektrischen Widerstand des Selens.

360. H. Pélabon (Comptes rendus 151, 641, 1910; Elektrochemische Zeitschrift 17, 252, 1910) Ueber die Zellen aus Selen und Selen-Antimonlegierungen.

361. Rignoux und Fournier (L'Industrie Electrique 19, 80, 1910; Telephone Engineer 3, 107, 1910/11; Der Mechaniker 20, 30, 1912) Ein neues Fernsehsystem.

362. E. Ruhmer (Der Mechaniker 18, 160, 1910) Der Fernseher der Gebrüder Andersen.

363. Saint Renée (Comptes rendus 150, 446, 1910) Fernseher.

364. T. Thorne-Baker (The Electrician 64, 1070, 1910) Ueber einige Eigenschaften des Selens.

365. T. Thorne-Baker (Elektrotechnische Zeitschrift 31, 224, 1910) Bildübertragung.

366. Timar (Deutsches Reichspatent 233 343, 233 344, 234 760 [42 h] 1910) Selenphotometer.

367. L. Tschörner (Englisches Patent 13 104 vom 24. 11. 1910) Bildtelegraph.

1911.

368. F. C. Brown (The Physical Review 32, 237, 1911) Die elektrischen Eigenschaften von positiv und negativ lichtempfindlichem Selen.

369. F. C. Brown (The Physical Review 32, 252, 1911) Die Natur der Erholung von positiv und negativ lichtempfindlichem Selen.

370. F. C. Brown (The Physical Review 33, 1, 1911; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 36, 114, 1912) Die Natur der Lichteinwirkung auf das Selen.

371. F. C. Brown (The Physical Review 33, 403, 1911; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 36, 894, 1912) Die Erholung der Giltay-Selenzelle und die Natur der Lichteinwirkung auf das Selen.

372. F. C. Brown und W. H. Clarc (The Physical Review 32, 251, 1911, und 33, 53, 1911) Eine Methode zur Messung von schnell verlaufenden Widerstandsänderungen.

373. L. B. Crum (The Physical Review 33, 538, 1911; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 36, 894, 1912) Einige Charakteristiken von negativ lichtempfindlichem Selen.

374. M. Dosai (Der Mechaniker 19, 54 und 137, 1911) Ein neuer Vorschlag zur Lösung des Fernseherproblems.

375. Br. Glatzel (Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 13, 778, 1911; Physikalische Zeitschrift 12, 1169, 1911) Die Trägheit der Selenzellen.

376. Gesellschaft für elektrotechnische Industrie (Deutsches Reichspatent 241 638 [42 h] 1911) Lichtmessung mit Selen.

377. N. Hesehus (Journal der Russischen physikalisch-chemischen Gesellschaft 43, 365, 1911; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 36, 627, 1912) Die elektrischen Eigenschaften der Körper in Abhängigkeit von ihrem allotropischen Zustande.

378. A. Korn und Br. Glatzel, Handbuch der Phototelegraphie Telautographie, Leipzig, Otto Nemnich, 1911.

379. O. Lindner und B. Replogle (Amerikanisches Patent 1 011 824 vom 12, 12, 1911) Selenzelle.

380. H. v. Martin (Physikalische Zeitschrift 12, 41, 1911) Beobachtungen an metallischen Leitern von sehr hohem Widerstand und elektronentheoretische Folgerungen.

381. A. Pochettino (Rendiconti della Regia Accademia dei Lincei 20, I, 428, 1911; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 36, 81, 1912) Ueber einige neue Verfahren kolloides Se darzustellen.

382. A. Pochettino (Il Nuovo Cimento Periodico di fisica 1, 147, 1911; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 36, 115, 1912) Ueber die Empfindlichkeit der Selenpräparate gegen das Licht.

383. Chr. Ries (Programm des Theresien-Gymnasiums München 1911; Physikalische Zeitschrift 12, 480 und 522, 1911) Die Ursache der Lichtempfindlichkeit des Selens.

384. Chr. Ries (Annalen der Physik und Chemie 36, 1055, 1911) Der Spannungseffekt am Selen und Antimonit.

385) B. L. Rosing (Der Mechaniker 19, 124 und 137, 1911) Ueber elektrische Teleskopie und die einzige Möglichkeit ihrer Verwirklichung.

386. Timar (Deutsches Reichspatent 242 751 [42 h] 1911) Selenphotometer.

387. B. Závada (Elektrotechnische Zeitschrift 32, 1111, 1911) Anordnung zur Beseitigung der störenden Wirkungen der Trägheit von Selenzellen für telephotographische Zwecke.

1912.

388. L. Amaduzzi (Physikalische Zeitschrift 13, 165, 1912) Ueber den inneren Hallwachseffekt am Selen.

389. L. Amaduzzi und M. Padoa (Il Nuovo Cimento Periodico di fisica 3, 66, 1912; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 36, 1104, 1912) Photoelektrische Leitfähigkeit und Hysteresis bei isomorphen Selenmischungen und Selen-Tellur-Mischungen.

390. F. C. Brown (The Physical Review 34, 201, 1912; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 36, 1102, 1912) Die tatsächliche Tiefe des Eindringens von Licht in das Selen.

391. F. C. Brown (Physikalische Zeitschrift 13, 859, 1912) Die Wirkung einer Verletzung durch Abschaben auf die elektrische Leitfähigkeit des Selens.

392. E. E. Fournier d'Albe (Proceedings of the Royal Society of London 86, 452, 1912; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 36, 1102, 1912) Ueber die Aenderung des Widerstandes von Selen mit der Spannung.

393. E. E. Fournier d'Albe (Physikalische Zeitschrift 13, 942, 1912; Proceedings of the Royal Society of London A 86, 454, 1912) Ueber das Optophon.

394. Br. Glatzel (Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 14, 607, 1912) Untersuchungen über Trägheit und Empfindlichkeit lichtempfindlicher Zellen.

395. W. S. Gripenberg (Physikalische Zeitschrift 13, 161, 1912) Ueber die Kristallisation dünner Selenplatten.

396. W. S. Gripenberg (Physikalische Zeitschrift 13, 686, 1912) Selenzelle hoher Empfindlichkeit.

397. F. Kaempf (Physikalische Zeitschrift 13, 689, 1912) Sättigungsströme im Selen.

398. A. Korn (Elektrotechnische Zeitschrift 33, 139, 1912) Station für Fernphotographie in Montecarlo.

399. A. Korn (Elektrotechnische Zeitschrift 33, 902, 1912) Fernphotographie.

400. O. Lindner und J. B. Replogle (The Electrical World No. 5, 251, 1912; Der Mechaniker 20, 148, 1912) Eine neue Form der Selenzelle.

401. Marino (Elektrotechnische Zeitschrift 33, 1193, 1912) Fernübertragung von Bildern.

402. W. E. Pauli (Annalen der Physik und Chemie 38, 870, 1912) Ueber die Phosphoreszenz von Selenverbindungen.

403. H. Pélabon (Comptes rendus 154, 1414, 1912; Beiblätter zu Annalen der Physik und Chemie 36, 1210, 1912) Ueber selenhaltige Ketten.

404. A. H. Pfund (The Physical Review 34, 370, 1912; Physikalische Zeitschrift 13, 507, 1912) Anwendung der Selenzellen in der Photometrie.

405. A. Pochettino (Nuovo Cimento Periodico di fisica 4, 56 und 189, 1912; Beiblätter zu den Annalen der Physik und Chemie 37, 967, 1913) Ueber die Ursache der Lichtempfindlichkeit der Selenpräparate.

406. Chr. Ries (Annalen der Physik und Chemie 38, 721, 1912) Der Spannungseffekt, eine allgemeine Eigenschaft der lichtempfindlichen Körper.

407. Chr. Ries (Der Mechaniker 20, 188 und 213, 1912)) Eine neue Form der Selenzelle.

408. E. Ruhmer (Der Mechaniker 20, 199, 1912) Eine neue Form der Selenzelle.

408a. E. Ruhmer (Elektrophysikalische Rundschau 3, 57, 1912) Ueber neuere photophonographische Versuche.

409. L. Tschörner (Der Mechaniker 20, 147, 1912) Bildtelegraph.

410. Uppenborn-Monasch, Lehrbuch der Photometrie, 1912, XIV. Kap. Selenphotometrie.

411. A. Weigl (Deutsches Reichspatent 38 644 vom 26. Aug. 1912) Verfahren zur Herstellung zweier genau gleicher Selenzellen.

412. A. Weigl (Deutsches Reichspatent 47 621 vom 25. Dez. 1912) Verfahren zur Beseitigung der Trägheit der Selenzellen.

413. Gyulai Zoltán (Physikalische Zeitschrift 13, 454, 1912) Ueber den Hallwachseffekt beim Selen.

1913.

414. F. C. Brown (Physical Review of the American Physical Society 1, 237, 1913) Eine Methode zur Herstellung negativ lichtempfindlichen Selens.

415. F. C. Brown (Physical Review of the American Physical Society 2, 153, 1913; Beiblätter zu den Annalen der Physik 38, 626, 1914) Die Einwirkung von Quecksilberdampf auf Selen.

416. F. C. Brown und L. Sieg (Physical Review of the American Physical Society 2, 487, 1913) Empfindlichkeitskurven des Selens.

417. L. Brunner-Krakau (Bericht über die 20. Hauptversammlung der Deutschen Bunsengesellschaft für angewandte physikalische Chemie zu Breslau vom 3.—6. August 1913; Physikalische Zeitschrift 14, 1247, 1913) Selenwasserstoff und Tellurwasserstoff oder Säure.

418. F. Diestelmeier (Physikalische Zeitschrift 14, 1000, 1913) Fluoreszenz der Elemente in der 6. Gruppe des periodischen Systems.

419. E. E. Fournier d'Albe (Bericht über die Tagung der British Association in Birmingham, 10.—17. Sept. 1913; Proceedings of the Royal Society, London A, 89, 75, 1913; Physikalische Zeitschrift 14, 1307, 1913) Die kleinste Lichtmenge, die durch Selen nachgewiesen werden kann.

420. W. S. Gripenberg (Physikalische Zeitschrift 14, 123, 1913) Der Brechungsindex des kristallinischen Selens.

421. H. Guilleminot (Comptes rendus 156, 1155, 1913). Ueber die Variation des Widerstandes von Selen, das von X-Strahlen und Radiumstrahlen getroffen wird.

422. H. Konen, Das Leuchten der Gase und Dämpfe, Braunschweig, Vieweg u. Sohn, 1913.

422a. A. Korn (Physikalische Zeitschrift 14, 1127, 1913) Ueber telegraphische Uebertragung kinematographischer Aufnahmen.

423. J. Meyer-Breslau (Bericht über die 20. Hauptversammlung der Deutschen Bunsengesellschaft für angewandte physikalische Chemie zu Breslau vom 3.—6. August 1913; Physikalische Zeitschrift 14, 1246, 1913) Eine neue Bestimmung des Atomgewichtes des Selens.

424. P. J. Nicholson (Physikalische Zeitschrift 14, 1210, 1913) Experimentaluntersuchungen an Selenzellen.

425. P. J. Nicholson (Physikalische Zeitschrift 14, 1213, 1913) Elektronentheorie der Lichtempfindlichkeit des Selens.

426. E. Reisz (Elektrotechnische Zeitschrift 34, 1359 [1362], 1913) Neues Verfahren zur Verstärkung elektrischer Ströme.

427. Chr. Ries (Zeitschrift für Feinmechanik 21, 5 und 14, 1913) Einfluß der Spannung und Vorbelichtung auf die Trägheit des Selens.

428. Chr. Ries (Zeitschrift für Feinmechanik 21, 61, 1913) Merkwürdiges Verhalten einer Selenzelle.

429. Chr. Ries, Die elektrischen Eigenschaften und die Bedeutung des Selens für die Elektrotechnik, Verlag Harrwitz, Berlin-Nikolassee. 2. Auflage, 1913.

430. W. Steubing (Physikalische Zeitschrift 14, 887 und 960, 1913) Fluoreszenz der Elemente in der 6. Gruppe des periodischen Systems, Schwefel—Selen—Tellurdampf.

430a. B. Thieme (Zeitschrift f. techn. Physik 1. 10. 1913) Flammen als physikalische Apparate.

1914.

431. M. Abonnenc (Comptes rendus 159, 41, 1914; Beiblätter zu den Annalen der Physik 38, 1345, 1914) Einfluß des Tellurs auf die Empfindlichkeit des Selens gegenüber Licht.

432. F. C. Brown und L. P. Sieg (Philosophical Magazine and Journal of Science 28, 497, 1914; Beiblätter zu den Annalen der Physik 39, 252, 1915) Der Sitz der Lichtwirkung in bestimmten Kristallen von metallischem Selen und einige diesbezügliche neue Eigenschaften.

433. F. C. Brown und L. P. Sieg (Physical Review of the American Physical Society 4, 48, 1914; Beiblätter zu den Annalen der Physik 39, 114, 1915) Wellenlängenempfindlichkeitskurven für lichtempfindliches Selen und ihre Deutung.

434. F. C. Brown (Physical Review of the American Physical Society 4, 85, 1914; Beiblätter zu den Annalen der Physik 39, 114, 1915) Die Kristallformen des metallischen Selens und einige ihrer physikalischen Eigenschaften.

435. E. O. Dietrich (Physical Review of the American Physical Society 4, 467, 1914; Beiblätter zu den Annalen der Physik 39, 251, 1915) Der Einfluß der Abkühlung auf die Charakteristiken von lichtempfindlichem Selen.

436. K. Foersterling und V. Fréedericksz (Annalen der Physik und Chemie 43, 1227, 1914) Dispersion und Absorption von amorphem und metallischem Selen.

437. G. E. Grantham (Physical Review of the American Physical Society 4, 259, 1914; Beiblätter zu den Annalen der Physik 39, 115, 1915) Der Zeitfaktor in dem Selenwiderstand.

438. W. S. Gripenberg Physikalische Zeitschrift 15, 462, 1914) Ueber die Tiefe der Lichtwirkung beim Selen.

439. M. Immelmann (Röntgentaschenbuch 6, 25, 1914) Das Fürstenausche Intensimeter.

440. M. Immelmann und J. Schütze (Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen 22, 533, 1914) Absorptionsmessungen mit dem Fürstenauschen Intensimeter.

441. W. Jänichen, Lichtmessungen mit Selen, Verlag Harrwitz, Berlin-Nikolassee, 1914.

442. A. Korn (Elektrotechnische Zeitschrift 35, 442 und 459, 1914) Ueber den gegenwärtigen Stand der Bildtelegraphie, insbesondere über ein neues Stufenrelais zur Verstärkung der Ströme, welche bisher durch die Selenmethode zur Verfügung gestellt wurden.

443. A. Korn (Prometheus 25, 609, 710, 754, 756, 1914) Ueber die telegraphische Uebertragung von Photographien. — I. Die prinzipiellen Grundlagen jeder telegraphischen Bildübertragung, die statistische Methode und einige geschichtliche Notizen über die Entwicklung der Bildtelegraphie. — II. Ueber die Selenmethode und die Reliefmethode. — III. Die telautographische Methode. — IV. Die Methode der Zwischenklisches.

444. P. J. Nicholson (Physical Review of the American Physical Society 3, 1, 1914; Beiblätter 38, 1343, 1914) Die physikalischen Eigenschaften des Selens.

445. H. Pelabon (Comptes rendus 158, 1669, 1914; Beiblätter zu den Annalen der Physik 39, 76, 1915) Thermoelektrische Prüfung von Selen-Antimonlegierungen.

446. H. Pelabon (Comptes rendus 158, 1897, 1914; Beiblätter zu den Annalen der Physik 39, 76, 1915) Ueber die thermoelektrischen Kräfte von Selen-Zinnlegierungen.

447. P. Pignatoro (Nuovo Cimento Periodico di fisica 6, 326, 1914; Beiblätter zu den Annalen der Physik 38, 1344, 1914) Ueber das Verhalten kristallinischen Selens gegenüber sichtbarer Strahlung.

448. W. dal Regno (Nuovo Cimento Periodico di fisica 8, 295, 1914; Beiblätter zu den Annalen der Physik 39, 527, 1915) Ueber die Natur des photoelektrischen Seleneffektes.

449. L. P. Sieg und F. C. Brown (Physical Review of the American Physical Society 4, 507, 1914; Beiblätter zu den Annalen der Physik 39, 527, 1915) Wellenlängenempfindlichkeitskurven einzelner Kristalle von metallischem Selen, mit einer teilweisen Erklärung der Komplixität der Lichtwirkung in Selenzellen.

450. A. M. Tyndall und G. W. White (Physikalische Zeitschrift 15, 154, 1914) Die Eigenschaften von Selenblöcken.

451. G. W. White (Philosophical Magazine and Journal of Science 27, 370, 1914) Die Eigenschaften von Selenblöcken.

1915.

452. J. Blondin (Telegraphen- und Fernsprech-Technik 4, 11, 1915) Bildtelegraphie.

453. F. C. Brown (Physical Review of the American Physical Society 5, 74, 1915) Einige fundamentale elektromechanische, photoelektrische und elektrische Beziehungen in Kristallen von metallischem Selen.

454. F. C. Brown (Physical Review of the American Physical Society 5, 75, 1915; auch Beiblätter zu den Annalen der Physik 39, 575, 1915) Die Anwendung der Elektronentheorie auf die Erklärung der elektrischen Leitung in Kristallen metallischen Selens.

455. F. C. Brown (Physical Review of the American Physical Society 5, 167, 1915; auch Beiblätter zu den Annalen der Physik 39, 529, 1915) Die elektrischen, photoelektrischen und elektromechanischen Eigenschaften einzelner Kristalle metallischen Selens, mit Anwendungen auf die Kristallstruktur.

456. F. C. Brown (Physical Review of the American Physical Society 5, 236, 1915; auch Beiblätter zu den Annalen der Physik 39, 721, 1915) Isolierung von Selenkristallen des zweiten und fünften Systems und die physikalischen Bedingungen für ihr Auftreten.

457. F. C. Brown (Physical Review of the American Physical Society 5, 395, 1915; auch Beiblätter zu den Annalen der Physik 39, 721, 1915) Das Wesen der elektrischen Leitung zum Zwecke der Erklärung der Widerstandsrückbildung des Selens nach vorhergegangener Bestrahlung.

458. F. C. Brown (Physical Review of the American Physical Society 5, 404, 1915; auch Beiblätter zu den Annalen der Physik 39, 722, 1915) Einige Experimente über die Natur der Lichtwirkungsübertragung in Kristallen metallischen Selens.

459. F. C. Brown (Scientific American 113, 147, 1915; auch Prometheus 27, 1358, 1915) Selenzellen und Selenkristalle.

460. Th. Christen (Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen. 23, 214, 1915/16) Messung heterogener Röntgenstrahlen.

461. D. Diestelmeier (Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie 15, 18 und 33, 1915) Ueber die Fluoreszenz von Schwefel-, Selen- und Tellurdampf.

462. D. S. Elliot (Physical Review of the American Physical Society 5, 53, 1915; auch Beiblätter zu den Annalen der Physik 39, 528, 1915) Eine vergleichende Untersuchung der Lichtempfindlichkeit von Selen und Schwefelantimon bei $+20$ und -190^0 C.

463. R. Fürstenau (Physikalische Zeitschrift 16, 276, 1915) Ueber die Verwendbarkeit des Selens zu Röntgenstrahlenenergiemessungen.

464. R. Grann (Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen 23, 267, 1915/16) Prinzipielles über die Selenzelle als Mittel zur Messung der Röntgenstrahlen.

465. R. Grann (Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen 23, 289, 1915/16) Ueber die Benützung des photochemischen Vorganges der Kalomelausscheidung zur Messung von Röntgenstrahlen und über photochemische Methoden überhaupt.

466. H. Holzknecht und C. Weißenberg (Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen 23, 257, 1915/16) Zur speziellen technischen Strahlenmessung.

467. R. Mayer (Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen 23, 283, 1915) Zur praktischen Anwendung der Selenzelle unter Vermeidung ihrer Fehler.

468. M. Meyer (Deutsche Medizinische Wochenschrift 41, 1312, 1915) Praktische Erfahrungen mit dem Fürstenauschen Intensimeter.

469. E. Raymond-Barker (Telegraphen- und Fernsprech-Technik 3, 199, 1915 und Helios Fachzeitschrift 459, 1915) Bildtelegraphie.

470. L. P. Sieg und F. C. Brown (Physical Review of the American Physical Society 5, 65, 1915; auch Beiblätter zu den Annalen der Physik 39, 528, 1915) Eine Erweiterung der Wellenlängenempfindlichkeitskurven einzelner Kristalle von metallischem Selen nach dem ultravioletten Spektrum.

471. L. P. Sieg und F. C. Brown (Physical Review of the Amerian Physical Society 5, 341, 1915) Ueber die Reflexion eines bestimmten Selenkristalles.

472. L. P. Sieg (Physical Review of the American Physical Society 6, 213, 1915; auch Beiblätter zu den Annalen der Physik 39, 720, 1915) Ein Versuch, eine Aenderung in der Wärmeleitfähigkeit eines Selenkristalls mit einer Aenderung in der Beleuchtung zu finden.

473. C. Stille (Telegraphen- und Fernsprech-Technik 3, 237, 1915 und Helios Fachzeitschrift 459, 529, 537, 1915) Bildtelegraphie.

474. P. Volz (Physikalische Zeitschrift 16, 209, 1915) Ueber die Verwendbarkeit des Selens zu Röntgenstrahlenenergiemessungen.

475. P. Volz (Physikalische Zeitschrift 16, 308, 1915) Ueber die Verwendbarkeit des Selens zu Röntgenstrahlenenergiemessungen.

476. C. Weißenberg (Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen 23, 297, 1915/16) Wege und Ziele in der Dosimeterfrage.

1916.

477. W. R. Cooper (Electrician 76, 676 und 705, 1916) Selenzellen.

478. E. Dietrich (Physical Review of the American Physical Society 8, 191, 1916) Der Einfluß der Temperatur auf die lichtempfindlichen Kurven von verschiedenen Selenzelltypen.

479. J. B. Flowers (Proc. Am. Inst. El. Eng., 1916; Elektrotechnik und Maschinenbau, Heft 31, 1916) Schreibmaschinen zum Niederschreiben gesprochener Laute.

480. R. Fürstenau (Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 18, 184, 1916). Ueber den elektrischen Widerstand des Selens.

481 H. Greinacher (Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 18, 117, 1916) Licht und Elektrizität im Selen.

482. H. Greinacher und C. W. Miller (Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 18, 283, 1916) Anomale Gleichrichterwirkung im Selen.

483. H. Hörig (Physikalische Zeitschrift 17, 178, 1916) Versuche über den Einfluß der Bestrahlung mit ultravioletten Licht auf das Emissionsvermögen von Metallen im Ultrarot.

484. A. Korn (Elektrotechnische Zeitschrit 37, 89, 1916) Eine für die Berechnung von Spannungsteilungen nützliche Formel.

485. A. Korn (Elektrotechnische Zeitschrift 37, 89, 1916) Neue Versuche zur Herstellung von Zwischenklischees für Bildtelegraphie in Gestalt von Lochstreifen und Buchstabentelegrammen.

486. A. Korn (Elektrotechnische Zeitschrift 37, 232, 1916) Die tönende Schrift für Blinde.

487. A. Korn (Die Naturwissenschaften 4, 689, 1916) Ueber die Entwicklung der Bildtelegraphie in den letzten 10 Jahren.

488. P. Lazarus (Münchener Medizinische Wochenschrift 63, 391, 1916) Neuer Lichthörer.

489. L. Machts (Deutsches Reichspatent 295 081, 21a, 16. 2. 1916) Vorrichtung zur Umsetzung von Lichtwirkungen in mechanische Wirkungen.

490. L. Machts (Deutsches Reichspatent 297 448, 21a, 26. 4. 1916) Apparat zur selbsttätigen Umsetzung von Druckschrift in Sprechlaute.

491. M. Meyer (Strahlentherapie 7, 473, 1916) Das Fürstenausche Intensimeter.

492. W. Porstmann (Prometheus 27, 217, 1916) Hörbare Schrift.

493. Chr. Ries, Sehende Maschinen, Verlag Huber, Diessen vor München, 1916.

494. Chr. Ries, Blindenlesemaschine, Verlag Huber, Diessen vor München, 1916.

495. Chr. Ries (Prometheus 27, 738, 1916 und 28, 698, 1917) Eine Blindenlesemaschine.

496. Chr. Ries (Zeitschrift für Feinmechanik 24, 171, 1916) Lichthörer und Blindenlesemaschine.

497. Ghr. Ries (Prometheus 28, 131, 1916; Zeitschrift für Feinmechanik 24, 221, 1916) Optische Zählvorrichtung, Ersatz der Briefmarke.

498. B. Thieme (Physikalische Zeitschrift 17, 259, 1916; vergl. auch Zeitschrift für techn. Physik 1. 10. 1913) Flammen als physikalische Apparate.

499. H. Wachtel (Strahlentherapie 7, 491, 1916) Ueber die Inkonstanz der Strahlungen der heutigen Röntgenröhren und Dosierungsversuche mit dem Fürstenauschen Intensimeter.

1917.

500. F. Ehrenhaft (Physikalische Zeitschrift 18, 352, 1917) Zur Physik des millionstel Zentimeters.

501. H. Greinacher (Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 19, 51, 1917) Widerstand und Polarisation der Selenzellen.

502. M. Hufschmidt (Zeitschrift für Feinmechanik 25, 2, 1917) Verfahren, um Blinden das Erkennen von Lichteindrücken zu ermöglichen.

503. J. Parankiewicz (Physikalische Zeitschrift 18, 567, 1917) Größen und elektrische Ladungen von kleinen Schwefel-, Selen- und Quecksilberkugeln.

504. D. Reichinstein (Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie, Photophysik und Photochemie 17, 16, 1917) Beitrag zur Kenntnis der Vorgänge in der lichtempfindlichen Selenzelle.

505. Chr. Ries (Zeitschrift für Feinmechanik 25, 1, 1917) Die Selenzelle im Dienst der Photographie.

506. Chr. Ries(Zeitschrift für Feinmechanik 25, 33, 1917) Empfindlichkeitsberechnung von lichtempfindlichen Zellen.

507. Chr. Ries (Zeitschrift für Feinmechanik 25, 21, 1917) Trägheitslose Selenzellen.

508. Chr. Ries (Zeitschrift für Feinmechanik 25, 41, 1917) Zusammenhang von Widerstand und Empfindlichkeit lichtempfindlicher Zellen.

509. Chr. Ries (Zeitschrift für Feinmechanik 25, 91, 1917) Die Messung der Röntgenstrahlen und das Intensimeter von Fürstenau.

510. Chr. Ries (Zeitschrift für Feinmechanik 25, 121, 1917) Blindenlesemaschinen.

511. Chr. Ries (Zeitschrift für Feinmechanik 25, 191 und 201, 1917) Photophorese und Lichtempfindlichkeit.

512. Chr. Ries (Zeitschrift für Feinmechanik 25, 207, 1917) Abhängigkeit der Leitfähigkeit und Lichtempfindlichkeit des Selens vom Druck.

1918.

513. Chr. Ries (Zeitschrift für Feinmechanik 26, 1, 10, 19, 1918) Ein neuer Lichteffekt; der Gleichrichtereffekt an lichtempfindlichen Zellen verschwindet im Lichte.

514. Chr. Ries (Zeitschrift für Feinmechanik 26, 25, 34, 1918) Neuere Forschungen über die Farbenempfindlichkeit des Selens.

D.

Verzeichnis der Autoren.

Abonnenc 105
Adamian 233
Adams 77, 95, 173, 195
Agostini 181, 218
Aichi 360
Albrecht 244
Allström 362
Amaduzzi 147, 181
Andersen 342
Anzel 359
Armangaud 364
Assche 354
Athanasiadis 98, 182
Aubel 185, 186
Ayrton 352
Barkla 267
Baumann 258
Belin 361
Bell 48
Bellati 133, 187, 216
Bellini 362
Berglund 356
Berndt 66, 95, 147, 181, 201, 218
Bernochi 364
Berthier 360
Berzelius 10
Bettendorf 16
Bidwell 19, 25, 31, 47, 65, 147, 201
Biltz 360
Bloch 185
Blondin 372
Blondlot 352
Blumencron 356
Bonola 185
Brandes 360
Brauly 364
Braun 352
Brequet 352
Brillouin 355
v. Bronk 48, 61
Brown 13, 63, 86, 89, 105, 113, 124, 127, 139, 171, 185, 217, 311
Buckney 244
Bumb 244
Buß 358
Carbonnelle 361
Carey 352
Carpenter 353
Carpini 100
Cavino 365
Cebrian 353
Chabot 210
Chiarini 41, 196
Christen 276
Clark 367
Clausen 61
Coblyn 358
Cooper 373
Cornu 16
Coste 15, 16
Courvoisier 252
Crum 172
Dafah 366
Davis 210
Day 173, 195
Diestelmeier 19
Dietrich 116
Dony-Henault 186
Dosai 348
Dowell 38, 79, 135, 142, 145, 181
Draper 351
Dubois 365
Du Moncell 353
Dussaud 357
Eggoroff 352
Ehrenhaft 19
Elliot 113, 122
Fabre 354
Finzenhagen 314
Fizeau 16
Flowers 305
Foersterling 17
Forkarth 357
Forssmann 352
Fortong 233
Fournier d'Albe 83, 244, 308
Frankenstein 360
Fréederichsz 17
Frikart 361
Fritts 58, 195
Fürstenau 61, 174, 179, 183, 262
Gemmil 354
Giltay 56, 75, 128, 148, 182
Glatzel 43, 87, 91, 133, 135, 139, 140, 143, 145, 194, 203
Gordon 351
Grann 244, 266
Grantham 371
Greinacher 174, 178, 209, 217
Griffiths 186
Gripenberg 18, 42, 52, 55, 57, 61, 63, 137
Guilleminot 276
Gyulai 198
Hammer 359
Haub 244
Hesehus 97, 128, 140, 210, 214
Himstedt 185, 210
Hittorf 61
Hoecken 244, 260
Hörig 373
Holzknecht 267
Hopius 95
Hufschmidt 323
Jaenicken 103, 243

Jaworski 360
Jenkins 356
Immelmann 267, 268, 271
Jones 244
Kalischer 64, 133, 163, 196
Kaempf 82, 216
Kipp & Zonen 61
Kleinberg 244
Knothe 359
Knox 350
Konen 19
Korda 218
Korn 97, 137, 143, 203, 220, 234, 236, 327
Kruyt 16, 203
Kuhlmann 286
Larroque 355
Lazarus 312
Le Blanc 352
Liebreich 362
Liesegang 53
Linde 352
Lindner 57
Longden 52
Lucas 244, 246, 249
Lussana 187, 216
Luterbacher 34, 77, 78
Lux 344
Maaß 258
Machts 324
Majorana 133
Manes 259
Marc 11, 13, 20, 22, 25, 31, 35, 39, 46, 50, 66, 123, 137, 147, 201
Marino 369
Martin 368
Massini 357
Matthiessen 187
May 61
Mayer R. 184, 272, 274
Meier W. 366
Meyer J. 370
Meyer M. 267
Mercadier 48
Merritt 210
Miller 174, 178
Minchin 189, 244
Mitscherlich 14, 15, 16
Molera 353
Moncell, siehe Du Moncell
Monasch 244
Montén 127
Morize 244
Moser 200
Moss 351
Muthmann 12
Neumann 16
Nicholson 96, 109, 142
Nipkow 354
Nisco 136, 241
Nutting 17
Nyström 356
Obach 185
Padoa 147
Paiva 352
Parankiewicz 374
Pauli 369
Pedrina 365
Pélabon 187, 194
Pellini 365
Perosino 352
Perreau 275
Perry 352
Petersen 22
Pfund 16, 17, 46, 52, 66, 95, 105, 114, 142, 147, 201, 211
Pignatoro 371
Pintsch 281
Pochettino 21, 24, 64, 87, 90, 109, 170, 173, 187, 203, 208
Poliakoff 244, 260
Pontois 356
Porstmann 374
Presser 51, 53, 61, 97, 292
Quincke 351
Rabourdin 356
Rammelsberg 351
Raymond Barker 372
Re 359
Regnault 16, 22
Reich 359
Reichinstein 209
Reiff 360
Reinganum 52, 192
Replogle 57
Ribbe 360
Ries 19, 24, 31, 34, 46, 53, 62, 66, 77, 89, 103, 136, 148, 173, 179, 191, 204, 211, 226, 254, 314
Rieß 350
Righi 57, 58, 187, 195
Rignoux 362
Rolls 240
Romanese 133
Rosing 368
Rosse 95
Ruhmer 46, 48, 97
Ruyven 148
Sabine 189
Sadler 267
Saeland 365
Saint Renée 367
Sale 351
Salviati 52, 53, 57, 289
Sawyer 353
Saunders 10, 11, 14, 15, 39
Schaffgotsch 15, 16
Schlechter 244
Schlesser 365
Schmidt 197
Schneider 360
Schöffler 356
Schrott 10, 14, 28, 29, 32, 65, 89, 165, 210, 214
Schütze 267, 268
Schulz 360
Semat 359
Senlecq 352
Seydlitz 358
Sieg 124, 187
Siemens 31, 33, 39, 47, 65, 95, 202, 214, 240
Silberstein 357
Simon Th. 293, 296, 300, 301, 358
Sicks 353
Sluginoff 353
Smith 61
Sperling 42, 66, 89, 99, 102, 108, 134, 147, 201, 214
Spring 16
Stebbins 127, 185
Steubing 19
Stephan 360
Stille 373
Sutton 355
Swinton 365
Szczepanik 356
Tanakadate 360
Thieme 370
Thompson 353
Thorne-Baker 367
Tietz 357
Timar 243, 244
Tissot 365
Tomlinson 353
Torda 135, 244
Trabacchi 170, 187, 216
Tschörner 335
Tyndall 42, 43, 58

Uljanin 11, 58, 66, 147, 173, 195, 201, 218
Uppenborn 244
Vidal 244
Viragh 357
Vogler 362
Volz 276
Wachtel 273
Weidert 65, 187, 216
Weidhaas 364
Weigel 19, 164, 174, 207
Weigl 225, 290
Weiller 355
Weinhold 43, 48
Weissenberg 266
White 42, 43, 58
Will 364
Wood 359
Wulf 244, 246, 249
Wüllner 16
Zavada 222

Siehe ferner das Literaturverzeichnis C S. 350.

E.

Sachregister.

A.

Absorption 16, 106, 213, 269
Alarmvorrichtungen 277
Anomale Selenzellen 148 u. f.
Astronomie, Verwendung des Selens i. d. A. 245
Auge, elektrisches 10, 219
Ausdehnungskoeffizient 16
Automatische Vorrichtungen 277, 301

B.

Becquereleffekt 9
Belichtungsträgheit 72
Belichtungszeit 95, 105, 111, 134
Bildübertragung 326
Blindenlesemaschine 307
Brechungsindex 18

D.

Differentialrelais 226, 240, 318
Drahtzelle 45
Drehspulrelais 330
Druck 40, 64, 86, 127
Druckkontaktzelle 57
Dünne Selenschichten 51, 213

E.

Eindringungstiefe 107, 137, 213, 271
Elektrodenmaterial 42, 44, 66, 143
Elektronische Vorgänge 9, 211 u. f.
Empfindlichkeitsberechnung 66
Empfindlichkeitskurven 91, 105
Erhitzungsprozeß 21 u. f.
Erholung 79, 128, 132, 151, 183, 200
Ermüdung 72, 100, 135, 167, 183, 198, 212
Erregung einer elektrom. Kraft 188, 218

F.

Farbenänderung des Selens 11
Farbenempfindlichkeit 95, 104, 142
Fernphotographie 326
Fernsehen 339
Feuchtigkeitsabgabe des Selens 24, 31, 152
Feuchtigkeitsgehalt des Selens 32, 147 u. f., 171, 207
Film, sprechender 306
Firnisüberzug 46, 50, 162
Fluoreszenz 19
Frankostempelmaschine 251

G.

Gasentladungsrelais 238
G-Effekt 180
Gleichgewicht von 2 Selenformen 36, 46, 202
Gleichrichtereffekt 173
Gravierte Zelle 50

H.

Hallwachseffekt 9, 196
Heliographenschreiber 289
Hertzeffekt 9
Hygrometer 149

Hygroskopische Eigenschaften des Selens 46, 148 u. f.
Hystereasis 26, 71, 99, 127

I.

Inkonstanz 33, 35, 167, 172, 220, 226
Intensimeter 263
Intermittierende Beleuchtung 75, 133
Ionisation 210
Isoliermaterial 45, 50, 51

K.

Katalysator 32, 35
Kinematograph, sprechender 306
Kristalle des Selens 13, 124, 128
Kristallisation 21, 37, 39, 62, 105

L.

Lichtelektrische Erscheinungen 9
Lichtelektrische Zerstreuung 9, 196, 213
Lichtempfindlichkeit 15, 61 u. f.
Lichthörer 307
Lichtkurve 73, 233
Lichtmessung 240
Lichtrelais 236, 328
Lichtspiel 306
Lichtstärke 95, 134, 158
Lichttelephonie 292
Löslichkeit 13

M.

Magnetooptische Erscheinungen 9
Mikrophonrelais 237
Modifikation, die M. des Selens 11, 15, 21

N.

Nachwirkung des Lichtes 72, 132
Negative Lichtempfindlichkeit 162

O.

Optophon, siehe Lichthörer
Oszillograph 73

P.

Photographie der Sprache 301
Photographie, Verwendung des Selens i. d. P. 269
Photometrie 240
Photoptonisches Rad 74
Photophorese 19
Phosphoreszenz 210
Polarisation 152, 156, 189, 191, 196, 209
Polarisiertes Relais 229
Porosität 19

R.

Radiumstrahlen, Einfluß der R. auf Selen 181.
Reflexion 17
Registrierapparate 249, 277, 301
Reinheit des Selens 19, 30, 143
Relais 227
Röntgenstrahlen, Einfluß der R. 181
Röntgenstrahlen, Messung der R. 261

Sch.

Schaltrelais 227
Schaltungen der Selenzelle 69 bis 71
Schatteneffekt 135
Schreibmaschine 305

S.

Sehende Maschinen 219
Sekundärströme 173
Selenelemente 188
Selenkompensator 220, 328
Selenkristalle 13, 124, 128
Selenrelais 231
Selenzelle, Herstellung der S. 41 u. f.
Selenzelle in Fassung 61
Sensibilisation 45, 50, 52, 62, 131
Signalapparate 277
Sortiermaschine 290
Spannung 77, 143, 193
Spannungseffekt 77, 144, 151
Spezifisches Gewicht 15
Spezifische Wärme 16
Spezifischer Widerstand 65
Sprechender Film 301
Stufenrelais 234

T.

Telephonrelais 238
Telephonische Wiedergabe von Gesprächen 301
Temperatur, Einfluß der T. 21, 64, 84, 88, 145
Temperaturkoeffizient 25—40, 89
Thermoelektrische Kraft 187, 216

Tiefenwirkung 43, 107, 137, 213, 271
Trägheit 72, 131, 143, 212, 220
Trocknung des Selens 19

U.

Übergangswiderstand von Selen und Elektrode 42, 43, 127, 130
Umlagerungen im Selen 27, 33, 35, 85, 93
Unipolare Leitung 153, 174
Unsichtbare Strahlen, Einfluß der 181
Ursache der Lichtempfindlichkeit 200

V.

Verdampfung von Feuchtigkeit im Selen 32, 161
Verdunkelungsträgheit 72
Verstärkung des Lichteffektes 227
Verunreinigungen des Selens 19, 30, 147, 172
Vorbelichtung 64, 105, 139, 140

W.

Wärmeabgabe des Selens 22, 31
Wärmeleitfähigkeit 187, 216
Wechselstrom, Einfluß des W. 64, 81, 170
Wechselstromeffekt 173

Z.

Zählvorrichtung 254
Zeemaneffekt 9
Zeitbestimmung 249
Zusammenhang von Widerstand und Lichtempfindlichkeit 62, 64
Zylinderzelle 48, 49
Zwischenklische 227, 233, 334.